

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ATAIDES MARINHESKI FILHO

APLICAÇÃO DA AMOSTRAGEM EM RODÍZIO EM POVOAMENTOS CLONAIS DE
Eucalyptus sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.

CURITIBA
2016

ATAIDES MARINHESKI FILHO

APLICAÇÃO DA AMOSTRAGEM EM RODÍZIO EM POVOAMENTOS CLONAIS DE
Eucalyptus sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Manejo Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal.

Orientador:
Professor Dr. Sylvio Péllico Netto

Coorientadores:
Professor(a) Dr. Sebastião do Amaral Machado
Dr^a. Ana Paula Dalla Corte

CURITIBA
2016

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Marinheski Filho, Ataides

Aplicação da amostragem em rodizio em povoamentos clonais de *Eucalyptus* sp. em região tropical do Brasil/ Ataides Marinheski Filho. – Curitiba, 2016.
135 f. : il.

Orientador: Dr. Sylvio Pellico Netto

Coorientadores: Dr. Sebastiao do Amaral Machado

Dra. Ana Paula Dalla Corte

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Defesa: Curitiba, 24/02/2016.

Área de concentração: Manejo Florestal.

1. Manejo florestal. 2. Amostragem (Estatística). 3. Eucalipto - Brasil. 4. Teses. I. Pellico Netto, Sylvio. II. Machado, Sebastiao do Amaral. III. Corte, Ana Paula Dalla. IV. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. V. Título.


CDD – 634.9

CDU – 634.0.524

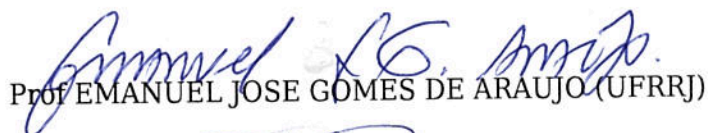
TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **ATAIDES MARINHESKI FILHO**, intitulada: **"APLICAÇÃO DA AMOSTRAGEM EM RODÍZIO EM POVOAMENTOS CLONAIS DE Eucalyptus sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL"**, após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua aprovação.

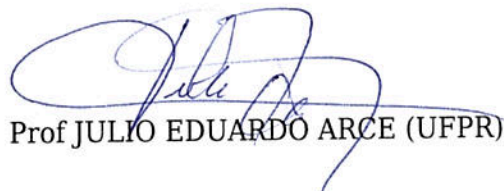
Curitiba, 24 de Fevereiro de 2016.



Prof SYLVIO PÉLLICO NETTO (UFPR)
(Presidente da Banca Examinadora)



Prof EMANUEL JOSE GOMES DE ARAUJO (UFRRJ)



Prof JULIO EDUARDO ARCE (UFPR)



BIOGRAFIA DO AUTOR

Ataides Marinhoski Filho, nascido em 05 de maio de 1984 no município de Mafra, estado de Santa Catarina. Filho de Ataides Marinhoski e Maria do Carmo Marinhoski. Neto dos avós paternos Pedro Marinhoski e Alzemira Gomes da Rocha Marinhoski e dos avós maternos José Pedro de Souza Lima e Verônica Rosvoldt Lima. Iniciou seus estudos no colégio Santo Antônio, cidade natal e colégio São José em Rio Negro, estado do Paraná. Serviu o Exército Brasileiro no ano de 2001, junto ao Quinto Regimento de Carro de Combate, em Rio Negro PR, onde ingressou no Núcleo Preparatório de Oficiais da Reserva – NPOR, se desligando no mesmo ano. Em 2002 prestou e foi aprovado nos vestibulares para o curso Agronomia na Universidade Estadual de Ponta Grossa – UEPG e de Odontologia na Uniplac, em Lages SC, porém não veio a cursá-los. Em 2003 iniciou suas atividades no setor florestal no município de Rio Negrinho SC, com a empresa Florestal Ouro Verde, se desligando em 2004 para atuar como supervisor florestal II na Famossul Móveis S.A., no município de Piên PR, empresa que generosamente oportunizou os primeiros contatos com o campo da biometria florestal. Nesse mesmo ano também ingressou no curso de Engenharia Florestal da Universidade do Contestado, Campus Canoinhas SC. Obteve o grau de Engenheiro Florestal em agosto de 2007, sendo que em novembro do mesmo ano inaugurou a empresa Brasil Florestal, voltada às atividades de inventário e geoprocessamento. Em 2009 foi convidado para ministrar a matéria de dendrometria ao curso de Engenharia Florestal da Universidade do Contestado – UnC. No mesmo ano cursou Gerenciamento Empresarial no SEBRAE. Em 2011 obteve o grau de especialização em Ciências Geográficas, área de concentração de Geomática, pela Universidade do Contestado. Em 2012 trabalhou para o Serviço Florestal Brasileiro em Brasília, durante o Inventário Florestal do Distrito Federal. Em 2013 realizou o Inventário Florestal Nacional em parte do estado do Paraná, pela cooperação com a *Food and Agriculture Organization* – FAO e Serviço Florestal Brasileiro. Neste mesmo ano se desligou do corpo docente da Universidade do Contestado, finalizado a orientação de 25 trabalhos de conclusão de curso. Em 2014 ingressou no Programa de Pós-graduação da Universidade Federal do Paraná. Até 2015 já inventariou cerca de 450 mil hectares de florestas plantadas e 4,2 milhões de hectares de florestas naturais em nove estados brasileiros.

*Às minhas filhas, Catarina Murakami
Marinheski e Cecília Murakami, à minha
esposa Mariane Hatsuno Murakami, aos
meus pais e irmãs.*

Dedico

AGRADECIMENTOS

Ao nosso Deus e por minha intercessora junto a ele Verônica Rosvoldt de Lima.

À Catarina Murakami Marinheski, razão maior de minha inspiração.

Em especial à minha mãe, Maria do Carmo Marinheski, o qual norteou com um gesto inesquecível e inigualável meu caminho de entrada na universidade.

Ao meu pai, Ataides Marinheski, por ser meu exemplo de vida, superação, força e caráter.

À minha mulher Mariane Hatsuno Murakami, por oportunizar-me o melhor dom da vida, ser pai. Por seu carisma, companheirismo e alegria que me oportunizaram os melhores momentos vividos.

Ao Professor e amigo Dr. Sylvio Péllico Netto, pelo carinho, gestos inesquecíveis de humildade, sinceridade, sabedoria, criatividade, inteligência e tão importantes ensinamentos que me prestou.

Ao Engenheiro Florestal Etsuro Murakami, por me auxiliar a compreender com afinco e objetividade o tão complexo mundo do *business*.

Aos Professores Dr^a. Ana Paula Dalla Corte e Dr. Sebastião do Amaral Machado, por balizar com sabedoria a orientação, contribuindo significativamente na elaboração do presente trabalho.

Ao nobre Engenheiro Florestal Cláudio Cerqueira, por disponibilizar parcialmente os dados para elaboração do presente trabalho, pelos bons momentos que dividimos sempre prazerosos e de muito aprendizado.

À Engenheira Florestal Heloisa Inês Dias, que contribuiu amplamente com seus conhecimentos de geoestatística.

Aos demais professores que ministraram disciplinas importantes para a ampliação de meu conhecimento.

Aos meus amigos Hassan Camil David, Rodrigo Otávio Veiga de Miranda e Emanuel Gomes de Araújo, que me proporcionaram boas trocas de experiências e aprendizado.

Obrigado!

"I am a child of the forest; no roof covers the spot where I was born. Old oaks and beeches shade its solitude and grass grows upon it. The first song I heard was of the birds of the forest, my first surroundings were trees. Thus my birth determined my calling!"

Johann Heinrich Cotta (1763-1844)

RESUMO

O objetivo deste estudo foi aplicar o processo de amostragem em rodízio para povoamentos de *Eucalyptus*. Para isso, foram usados duas fontes de dados, sendo: 1) Povoamentos de *Eucalyptus* sp. que somam 2.110,66 hectares, localizados em região tropical do Brasil, contemplando três Unidades Anuais de Produção (UAP), com idade inicial de 2,5 anos (UAP 2,5), 3,5 anos (UAP 3,5) e 4,5 anos (UAP 4,5), remedidas anualmente entre 2011 e 2014, numa intensidade amostral de 1 Unidade Amostral a cada 2,5 hectares (1:2,5), totalizando 845 Unidades Amostrais (UA) de área variável, alocadas em *grid* sistemático quadrado; 2) Povoamentos de *Eucalyptus dunnii* Maiden que somam 123,90 hectares, localizado em Três Barras, Santa Catarina, contemplando talhões com idade média de 6,2 anos, mensurados em uma única ocasião em 2015, numa intensidade amostral de 1:3, totalizando 41 UA de área variável e para o talhão 12, numa intensidade de 1:1, totalizando 7 UA de área fixa e 7 de área variável, sendo a distribuição das UA de forma aleatória, para ambos os casos. Para melhor apresentação, foram produzidos 3 capítulos que abordam: 1) Classificação de sítios florestais em povoamentos de *Eucalyptus* sp. em região tropical do Brasil; 2) Método de amostragem com probabilidade proporcional à área variável (PPAV) em povoamentos de *Eucalyptus dunnii* Maiden em Três Barras, Santa Catarina; 3) Apresentação conceitual do processo de amostragem em rodízio para povoamentos de *Eucalyptus* sp. em região tropical do Brasil. No capítulo I foram ajustados modelos com fundamentação biológica aplicando os métodos da curva guia (*guide-curve*-GC), diferenças algébricas (*Algebraic Difference Approach* – ADA) e das diferenças algébricas generalizadas (*Generalized Algebraic Difference Approach* -GADA) para avaliação de sítios florestais. De maneira complementar, a geoestatística (via krigagem ordinária) foi usada para modelar a distribuição espacial da capacidade produtiva e obter, conseqüentemente, a delimitação geográfica e computo de área por UAP e classe de sítio. Neste capítulo foram usados os softwares *ArcGis 10.2.2*, *Microsoft Excel*, *R* e *Statgraphics*. No capítulo 2 o método com probabilidade proporcional à área variável (PPAV) foi aplicado aos dados de povoamentos de *Eucalyptus dunnii* Maiden, sendo este comparado com o uso do método de área fixa, cuja probabilidade de ocorrência dos indivíduos é proporcional à área (PPA). Na comparação entre PPAV e PPA foi usada uma imagem aérea de altíssima resolução espectral (0,25cm), tomada por Veículo Aéreo não Tribulado (VANT) para contagem total das árvores vivas do talhão 12 e cálculo de sua área em hectare. No capítulo 3 o processo de amostragem em rodízio foi aplicado nas três diferentes intensidades amostrais: 1:2,5, 1:5 e 1:10, sendo comparado com a maior intensidade amostral (1:2,5). A análise estatística da amostragem foi realizada de forma estratificada por UAP e classe de sítio. Por fim, o modelo de Clutter (1963) foi ajustado para gerar a prognose da produção na idade de referência de 7 anos, com base nas diferentes intensidades amostrais e identificar o impacto que essas geram nos estimadores de predição do volume em nível de povoamento.

Palavras-chave: Geoestatística, técnicas de amostragem, capacidade produtiva.

ABSTRACT

The aim of this study was to apply the trundle sampling process to stands of *Eucalyptus*. For this, two data sources were used: 1) Stands of *Eucalyptus* sp. totaling 2,110.66 hectares, located in the tropical region of Brazil, comprising three Annual Production Units (APUs), with initial age of 2.5 years old (UAP 2.5), 3.5 years old (UAP 3.5) and 4.5 years old (APU 4.5), remeasured annually between 2011 and 2014, with a sampling intensity of 1 Sampling Unit - SU every 2.5 hectares (1: 2.5), totaling 845 sampling units of variable area, allocated in a square systematic grid; 2) Stands of *Eucalyptus dunnii* Maiden totaling 123.90 hectares, located in Três Barras, Santa Catarina State, including plots with an average age of 6.2 years old, measured on a single occasion in 2015, with a sampling intensity of 1:3 hectares, totaling 41 variable area SUs and also for the compartment 12, an intensity of 1:1, totaling 7 fixed area plots and 7 with variable area, both sets randomly distributed. To better organize the presentation, three separated chapters were included covering: 1) Classification of forest sites in *Eucalyptus* sp. in tropical region of Brazil; 2) Sampling process with probability proportional to the variable area (PPVA) in stands of *Eucalyptus dunnii* Maiden in Três Barras, Santa Catarina State 3) Concept presentation for the Trundle Sampling - TS for stands of *Eucalyptus* sp. in tropical region of Brazil. In chapter 1, models with biological foundation were adjusted applying the methods of the guide curve (guide-curve-GC), algebraic differences (Algebraic Difference Approach - ADA) and generalized algebraic differences approach (Generalized Algebraic Difference Approach - GADA) for forest site evaluations. Additional to that, geostatistic (kriging ordinary) was used to model the spatial distribution of growth and yield capacity and obtain therefore the geographical boundaries and area computation by APU and site index class. In this chapter ArcGIS software 10.2.2, Microsoft Excel, R and Statgraphics were used. In chapter 2, the method with probability proportional of variable area (PPVA) was applied to stands of *Eucalyptus dunnii* Maiden, and was compared to the fixed area method, whose probability of inclusion of individuals is proportional to a defined area (PPA). To compare PPAV and PPA an aerial image of highest spectral resolution (0,25m), taken by VANT was obtained for total count of live trees in the stand 12 and to calculate its area in hectare. In Chapter 3 the sampling procedure was applied using Trundle Sampling with three different sample intensities: 1: 2.5, 1: 5 and 1:10, and compared with the largest sample size (1:2.5). The statistical analysis was performed applying stratification by APU and site index class. Finally, the Clutter model (1963) was applied to generate the growth and yield equation for a reference age of 7 years old, based on different sample sizes and identify the impact caused by them on volume prediction estimators at stand levels.

Key-words: Geostatistic, sampling techniques, productive capacity.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 – CURVAS DE ÍNDICE DE SÍTIO DE 24M AJUSTADAS POR BURKHART E TENNENT, (1977) PARA A REGIÃO DO PLATÔ VULCÂNICO E PLANÍCIE CANTERBURY NA NOVA ZELÂNDIA.....	27
FIGURA 1.2 – EVOLUÇÃO HISTÓRICA DOS MODELOS ESTÁTICOS (QUADRO TRACEJADO E CITAÇÕES SUBLINHADAS); EQUAÇÕES DE SÍTIO DINÂMICAS COM IDADE-BASE INVARIANTE (CITAÇÕES LIMPAS); EQUAÇÕES DE SÍTIO COM IDADE-BASE VARIANTE (CITAÇÕES EM QUADRO SÓLIDO).	28
FIGURA 1.3 – COMPONENTES QUE REPRESENTAM UM SEMIVARIOGRAMA .	31
FIGURA 1.4 – LOCALIZAÇÃO DO POVOAMENTO DE <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.	37
FIGURA 1.5 – ESQUEMA DE INSTALAÇÃO DAS UNIDADES AMOSTRAIS.....	40
FIGURA 1.6 – DISTRIBUIÇÃO RESIDUAL DO MODELO HIPSOMÉTRICO (A) E DO VOLUME (B).	42
FIGURA 1.7 – LOCALIZAÇÃO DO POVOAMENTO DE <i>Eucalyptus dunnii</i> MAIDEN EM TRÊS BARRAS, SC.....	43

CAPÍTULO I: CLASSIFICAÇÃO DE SÍTIO PARA *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL

FIGURA 2.1 – DISTRIBUIÇÃO RESIDUAL DO MODELO HIPSOMÉTRICO (A) E DO VOLUME (B).	57
FIGURA 2.2 – DISTRIBUIÇÃO RESIDUAL DOS MODELOS DE CLASSIFICAÇÃO DE SÍTIOS FLORESTAIS EM POVOAMENTOS DE <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.	66
FIGURA 2.3 – CURVAS MÉDIAS DE SÍTIO DOS CINCO MODELOS AJUSTADOS PARA POVOAMENTOS DE <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.	67
FIGURA 2.4 – CLASSES DE SÍTIO PARA POVOAMENTOS DE <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.	68
FIGURA 2.5 – COMPORTAMENTO ESTÁVEL DAS ALTURAS DOMINANTES EM UMA MESMA CLASSE DE SÍTIO PARA <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.	70
FIGURA 2.6 – SEMIVARIOGRAMAS DO MODELO EXPONENCIAL PARA <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.....	71
FIGURA 2.7 – MAPA TEMÁTICO DA CLASSIFICAÇÃO DE SÍTIO COM BASE NA KRIGAGEM ORDINÁRIA PARA <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.	73

**CAPÍTULO II: MÉTODO DE AMOSTRAGEM COM PROBABILIDADE
PROPORCIONAL À ÁREA VARIÁVEL EM POVOAMENTOS DE *Eucalyptus
dunnii* MAIDEN EM TRÊS BARRAS, SC**

FIGURA 3.1– DETALHE DA IMAGEM DE ALTA RESOLUÇÃO ESPECTRAL E ATRIBUIÇÃO DE PONTOS POR COPA SOB UM PLANTIO DE <i>Eucalyptus dunnii</i> MAIDEN EM TRÊS BARRAS, SC.....	84
FIGURA 3.2 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS ÁRVORES IDENTIFICADAS NA IMAGEM DE ALTA RESOLUÇÃO ESPECTRAL EM POVOAMENTO DE <i>Eucalyptus dunnii</i> MAIDEN EM TRÊS BARRAS, SC.	85
FIGURA 3.3 – DISTRIBUIÇÃO ALEATÓRIA DE 7 UA DE ÁREA FIXA (A) E 7 UA DE ÁREA VARIÁVEL (B) EM POVOAMENTO DE <i>Eucalyptus dunnii</i> MAIDEN EM TRÊS BARRAS, SC.....	86

**CAPÍTULO III: APRESENTAÇÃO CONCEITUAL DO PROCESSO DE
AMOSTRAGEM EM RODÍZIO PARA POVOAMENTOS DE *Eucalyptus* sp. EM
REGIÃO TROPICAL DO BRASIL**

FIGURA 4.1 – UNIDADES ANUAIS DE PRODUÇÃO (UAP`S) EM POVOAMENTOS DE <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.....	109
FIGURA 4.2 – MAPA TEMÁTICO DA KRIGAGEM ORDINÁRIA COM MODELO EXPONENCIAL EM POVOAMENTOS DE <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.	110
FIGURA 4.3 – TALHÕES SELECIONADOS PARA O PRIMEIRO ANO DE RODÍZIO EM POVOAMENTOS DE <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL....	111
FIGURA 4.4 – TALHÕES SELECIONADOS PARA O SEGUNDO ANO DE RODÍZIO EM POVOAMENTOS DE <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL....	112
FIGURA 4.5 – PROCESSO DE AMOSTRAGEM SISTEMÁTICA NA INTENSIDADE 1:2,5 HECTARES EM POVOAMENTOS DE <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.	113
FIGURA 4.6 – PROCESSO DE AMOSTRAGEM SISTEMÁTICA NA INTENSIDADE 1:5 HECTARES EM POVOAMENTOS DE <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.	114
FIGURA 4.7 – PROCESSO DE AMOSTRAGEM SISTEMÁTICA NA INTENSIDADE 1:10 HECTARES EM POVOAMENTOS DE <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.	115
FIGURA 4.8 – DISTRIBUIÇÃO GRÁFICA RESIDUAL DO MODELO DE SULLIVAN-CLUTTER (1963) EM POVOAMENTOS DE <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.	131
FIGURA 4.9 – PROGNOSE DO VOLUME AOS 7 ANOS PARA AS DIFERENTES SIMULAÇÕES EM POVOAMENTOS DE <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.	132

LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 – MÉTODOS UTILIZADOS PARA AVALIAR A PRODUTIVIDADE DO SÍTIO FLORESTAL.....	24
TABELA 1.2 – UNIDADES ANUAIS DE PRODUÇÃO (UAP) DE <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.....	38
TABELA 1.3 – MODELAGEM PARA A ALTURA TOTAL E VOLUME INDIVIDUAL DE POVOAMENTO DE <i>Eucalyptus dunnii</i> MAIDEN EM TRÊS BARRAS, SC.....	44

CAPÍTULO I: CLASSIFICAÇÃO DE SÍTIO PARA *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL

TABELA 2.1 – CARACTERIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS UTILIZADAS PARA O AJUSTE DOS MODELOS DE ÍNDICE DE SÍTIO PARA <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.....	58
TABELA 2.2 – MODELOS NÃO-LINEARES AJUSTADOS PARA CLASSIFICAÇÃO DE SÍTIOS FLORESTAIS DE <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL COM O MÉTODO DA CURVA GUIA E DIFERENÇAS ALGÉBRICAS.....	59
TABELA 2.3 – MODELO NÃO-LINEAR AJUSTADO PARA CLASSIFICAÇÃO DE SÍTIOS FLORESTAIS DE <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL COM O MÉTODO DAS DIFERENÇAS ALGÉBRICAS GENERALIZADAS.....	59
TABELA 2.4 – COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS DE MODELOS PARA CLASSIFICAÇÃO DE SÍTIOS FLORESTAIS DE <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.....	65
TABELA 2.5 – VALORES DOS LIMITES SUPERIOR (LS) E INFERIOR (LI) E DE CENTRO (C) DAS CLASSES DE ÍNDICE DE SÍTIO PARA <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.....	69
TABELA 2.6 – RESULTADOS DOS SEMIVARIOGRAMAS AJUSTADOS PARA HDOM NA IDADE DE REFERÊNCIA EM <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.....	71
TABELA 2.7 – RESULTADOS DA VALIDAÇÃO CRUZADA PARA O MODELO EXPONENCIAL PARA <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.....	72
TABELA 2.8 – RESUMO DE ÁREAS POR UAP E SÍTIO PARA <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.....	72

CAPÍTULO II: MÉTODO DE AMOSTRAGEM COM PROBABILIDADE PROPORCIONAL À ÁREA VARIÁVEL EM POVOAMENTOS DE *Eucalyptus dunnii* MAIDEN EM TRÊS BARRAS, SC

TABELA 3.1 – DADOS DOS TALHÕES E UNIDADES AMOSTRAIS DE <i>Eucalyptus dunnii</i> MAIDEN EM TRÊS BARRAS, PLANALTO NORTE CATARINENSE.....	83
--	----

TABELA 3.2 – RESULTADOS DOS ESTIMADORES BÁSICOS OBTIDOS EM 41 PARCELAS DE <i>Eucalyptus dunnii</i> MAIDEN EM TRÊS BARRAS, SC.....	90
TABELA 3.3 – RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MÉTODO DE AMOSTRAGEM PPAV EM 41 PARCELAS DE <i>Eucalyptus dunnii</i> MAIDEN EM TRÊS BARRAS, SC.	91
TABELA 3.4 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS COM APLICAÇÃO DO MÉTODO DE AMOSTRAGEM PPAV EM 41 PARCELAS DE <i>Eucalyptus dunnii</i> MAIDEN EM TRÊS BARRAS, SC.....	92
TABELA 3.5 – INTERVALOS DE CONFIANÇA PARA OS ESTIMADORES OBTIDOS COM A AMOSTRAGEM PPAV EM 41 PARCELAS DE <i>Eucalyptus dunnii</i> MAIDEN EM TRÊS BARRAS, SC.....	93
TABELA 3.6 – ÁREA, DENSIDADE E VOLUME OBTIDO PELO CENSO EM POVOAMENTO DE <i>Eucalyptus dunnii</i> MAIDEN EM TRÊS BARRAS, SC.	93
TABELA 3.7 – DENSIDADE E VOLUME OBTIDO COM AS UA'S DE ÁREA FIXA EM POVOAMENTOS DE <i>Eucalyptus dunnii</i> MAIDEN EM TRÊS BARRAS, SC.....	94
TABELA 3.8 – DENSIDADE E VOLUME OBTIDO COM AS UA'S DE ÁREA VARIÁVEL EM POVOAMENTO DE <i>Eucalyptus dunnii</i> MAIDEN EM TRÊS BARRAS, SC.	94
TABELA 3.9 – DENSIDADE E VOLUME OBTIDO COM AS UA'S DE ÁREA VARIÁVEL EM POVOAMENTO DE <i>Eucalyptus dunnii</i> MAIDEN EM TRÊS BARRAS, SC.	94

CAPÍTULO III: APRESENTAÇÃO CONCEITUAL DO PROCESSO DE AMOSTRAGEM EM RODÍZIO PARA POVOAMENTOS DE *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL

TABELA 4.1 – RESUMO DE ÁREAS POR ANO DE RODÍZIO, UAP E SÍTIO PARA <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.....	116
TABELA 4.2 – SIMULAÇÕES PARA MODELAGEM DA PRODUÇÃO PARA <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.....	118
TABELA 4.3 – ESTIMADORES POR HECTARE DA AMOSTRAGEM EM RODÍZIO NA INTENSIDADE DE 1:2,5 HECTARES PARA <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.	119
TABELA 4.4 – ESTIMADORES PARA A POPULAÇÃO DA AMOSTRAGEM EM RODÍZIO NA INTENSIDADE DE 1:2,5 HECTARES PARA <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.	120
TABELA 4.5 – ESTIMADORES POR HECTARE DA AMOSTRAGEM EM RODÍZIO NA INTENSIDADE DE 1:5 HECTARES PARA <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.	121
TABELA 4.6 – ESTIMADORES PARA A POPULAÇÃO DA AMOSTRAGEM EM RODÍZIO NA INTENSIDADE DE 1:5 HECTARES PARA <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.	122

TABELA 4.7 – ESTIMADORES POR HECTARE DA AMOSTRAGEM EM RODÍZIO NA INTENSIDADE DE 1:10 HECTARES PARA <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.	122
TABELA 4.8 – ESTIMADORES PARA A POPULAÇÃO DA AMOSTRAGEM EM RODÍZIO NA INTENSIDADE DE 1:10 HECTARES PARA <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.	123
TABELA 4.9 – RESUMO DOS ESTIMADORES PARA A POPULAÇÃO COM A AMOSTRAGEM EM RODÍZIO NAS DIFERENTES INTENSIDADES AMOSTRAIS COMPARADO COM O PRT PARA <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.	125
TABELA 4.10 – ANOVA DOS ESTIMADORES PARA A POPULAÇÃO TOTAL PARA <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.....	125
TABELA 4.11 – ESTIMADORES AMOSTRAIS DA PRT PARA A UAP _{4,5} , SEUS COMPARTIMENTOS E CLASSES DE SÍTIO PARA <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.	126
TABELA 4.12 – ANOVA DOS ESTRATOS FORMADOS PARA <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.	127
TABELA 4.13 – ESTRATOS, RESPECTIVAS ÁREAS E PESOS PARA EUCALYPTUS SP. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.....	127
TABELA 4.14 – ANÁLISE ESTATÍSTICA ESTRATIFICADA PARA POVOAMENTOS DE EUCALYPTUS SP. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.....	128
TABELA 4.15 – INTERVALO DE CONFIANÇA DO VOLUME TOTAL PARA POVOAMENTOS DE <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.....	128
TABELA 4.16 – PARAMETROS E ESTATÍSTICA DO MODELO DE SULLIVAN-CLUTTER (1963) PARAS AS DIFERENTES SIMULAÇÕES EM POVOAMENTOS DE <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.....	129
TABELA 4.17 – PROGNOSE DO VOLUME POR HECTARE AOS 7 ANOS PARA AS DIFERENTES SIMULAÇÕES EM POVOAMENTOS DE <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.	131

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	18
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	24
2.1 CLASSIFICAÇÃO DA CAPACIDADE PRODUTIVA	24
2.1.1 Evolução histórica, conceitos e aplicações	24
2.2 GEOESTATÍSTICA.....	29
2.2.1 Evolução histórica, conceitos e aplicações na área florestal.....	29
2.3 TEORIA DA AMOSTRAGEM.....	32
2.3.1 Métodos de Amostragem	32
2.3.2 Processos de Amostragem	33
2.3.3 Sistemas de Amostragem	34
2.3.4 Inventários Florestais Contínuos.....	35
3. ÁREAS DE ESTUDO	37
3.1 BASE DE DADOS PARA O CAPÍTULO I E III.....	37
3.1.1 Localização, clima e solo	37
3.1.2 Origem dos dados para classificação do sítio e processo de amostragem em rodízio.....	38
3.1.3 Modelos para estimar a altura total e volume.....	40
3.1.3.1 Modelo para a Altura total	40
3.1.3.2 Modelo para o volume.....	41
3.1.4 Validação do Modelo Hipsométrico e de Volume.....	42
3.2 BASE DE DADOS PARA O CAPÍTULO II	43
3.2.1 Localização, clima e solo	43
3.2.2 Modelos para estimar a altura e o volume	44
4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46
CAPÍTULO I.....	50
CLASSIFICAÇÃO DE SÍTIO PARA <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.....	50
RESUMO.....	50
CHAPTER I.....	51
SITE CLASSIFICATION TO <i>Eucalyptus</i> sp IN TROPICAL REGION OF BRAZIL ..	51
ABTRACT	51

1. INTRODUÇÃO CAPÍTULO I	52
1.1 OBJETIVO GERAL CAPÍTULO I	56
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS CAPÍTULO I	56
2. MATERIAL E MÉTODOS CAPÍTULO I	57
2.1 FORMULAÇÃO DA METODOLOGIA GADA	60
2.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DA MODELAGEM	62
2.3 APLICAÇÃO DA KRIGAGEM ORDINÁRIA	63
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO CAPÍTULO I	65
3.1 CLASSIFICAÇÃO DE SÍTIO	65
3.2 KRIGAGEM ORDINÁRIA	70
4. CONCLUSÕES CAPÍTULO I	74
5. RECOMENDAÇÕES CAPÍTULO I	75
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS CAPÍTULO I	76
CAPÍTULO II	78
MÉTODO DE AMOSTRAGEM COM PROBABILIDADE PROPORCIONAL À ÁREA VARIÁVEL EM POVOAMENTOS DE <i>Eucalyptus dunnii</i> MAIDEN EM TRÊS BARRAS, SC.	78
RESUMO	78
CHAPTER II	79
SAMPLING METHODS WITH PROBABILITY PROPORTIONAL TO THE VARIABLE AREA IN STANDS OF <i>Eucalyptus dunnii</i> MAIDEN IN TRÊS BARRAS, SANTA CATARINA STATE.	79
ABTRACT	79
1. INTRODUÇÃO CAPÍTULO II	80
1.1 OBJETIVO GERAL CAPÍTULO II	82
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS CAPÍTULO II	82
2. MATERIAL E MÉTODOS CAPÍTULO II	83
2.1 DESCRIÇÃO DOS DADOS PARA EXEMPLIFICAR O MÉTODO DE ÁREA VARIÁVEL	83
2.2 DESCRIÇÃO DOS DADOS PARA COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO DE ÁREA VARIÁVEL E DE ÁREA FIXA	84
2.3 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO DO MÉTODO DE ÁREA VARIÁVEL	86
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO CAPÍTULO II	90
3.1 RESULTADOS DA APROPRIAÇÃO DO MÉTODO DE ÁREA VARIÁVEL	90

3.2 COMPARATIVO ENTRE CENSO, MÉTODO DE ÁREA FIXA E MÉTODO DE ÁREA VARIÁVEL.....	93
4. CONCLUSÕES CAPÍTULO II	96
5. RECOMENDAÇÕES CAPÍTULO II.....	97
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS CAPÍTULO II	98
CAPÍTULO III	99
APRESENTAÇÃO CONCEITUAL DO PROCESSO DE AMOSTRAGEM EM RODÍZIO PARA POVOAMENTOS DE <i>Eucalyptus</i> sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.....	99
RESUMO.....	99
CHAPTER III.....	100
PRESENTATION CONCEPT OF TRUNDLE SAMPLING FOR STANDS OF <i>Eucalyptus</i> sp. IN TROPICAL REGION OF BRAZIL	100
ABSTRACT	100
1. INTRODUÇÃO CAPÍTULO III	101
1.1 OBJETIVO GERAL CAPÍTULO III	103
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS CAPÍTULO III.....	103
2. MATERIAL E MÉTODOS CAPÍTULO III.....	104
2.1 CONCEPÇÃO TEÓRICA DO PROCESSO DE AMOSTRAGEM EM RODÍZIO PARA POVOAMENTOS.....	104
2.2 DADOS PARA APLICAÇÃO DO PROCESSO DE AMOSTRAGEM EM RODÍZIO PARA POVOAMENTOS.....	108
2.3 IMPACTOS DO PROCESSO DE AMOSTRAGEM EM RODÍZIO NAS ESTIMATIVAS DE PROGNÓSE AO NÍVEL DE POVOAMENTO	117
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO CAPÍTULO III	119
3.1 ESTIMADORES EM NÍVEL DE UAP E SÍTIO.....	119
3.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DA AMOSTRAGEM ESTRATIFICADA.....	126
3.3 ANÁLISE DO CRESCIMENTO E DA PRODUÇÃO FLORESTAL	129
4. CONCLUSÕES CAPÍTULO III	133
5. RECOMENDAÇÕES CAPÍTULO III	134
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS CAPÍTULO III	135

1. INTRODUÇÃO GERAL

A sobrevivência da humanidade em nível global esteve sempre ligada e dependente dos recursos naturais, sendo que, evolutivamente, a concepção de preservação desse patrimônio tem se voltado à sustentabilidade em nível mundial, quase sempre por aqueles que se beneficiam dele indiretamente. Esse aspecto resultou também no surgimento de relações jurídicas, ambientais e governamentais, com o intuito de proteger e diminuir a pressão sob essas fontes esgotáveis de bens e serviços.

Não obstante, as florestas naturais do Brasil apresentam histórico de explorações não sustentadas, desenfreadas e oportunistas, desde os primórdios do descobrimento. Há 515 anos, possuía, aproximadamente, 85% de sua extensão territorial coberta por florestas de diversos biomas (MACEDO; MACHADO, 2003).

As políticas públicas para redução de impactos e a crescente demanda por matéria prima, próximas aos mercados consumidores, impulsionaram o surgimento dos primeiros plantios florestais. No ano de 1904, com o intuito de produzir matéria prima para as locomotivas e atender a demanda de dormentes da Companhia Paulista de Estradas de Ferro, o agrônomo Edmundo Navarro de Andrade introduziu as primeiras espécies de *Eucalyptus* no Brasil.

Trinta anos depois, em 1934, o então presidente Getúlio Vargas editou o primeiro decreto que previa a utilização limitada da ocupação do solo e dos recursos naturais no Brasil.

No entanto, os plantios florestais cresceram expressivamente no Brasil apenas na década de 60, com início das políticas de incentivos fiscais em 1965, item incluso junto à sanção da Lei 4771/65, pelo presidente Castello Branco, segundo código florestal brasileiro que vigorou, com certas alterações, até o lastro temporal de 2012, quando então foi aprovado em 25 de maio o novo código florestal, com a promulgação da Lei 12.651/12.

Ainda na década de 60, precisamente em 1960, surgiu a primeira Escola de Florestas na cidade de Viçosa MG, a qual foi transferida por questões políticas pelo Presidente João Goulart para a capital paranaense, Curitiba, em 1963. Essa Escola de Florestas se consolidou no Brasil, principalmente pela incansável disposição de

seus docentes e dos apoios decisivos dados pela *Food and Agriculture Organization* – FAO e pela Universidade de Albert-Ludwigs de Freiburg na Alemanha (MACEDO; MACHADO, 2003).

Além de universidades, várias entidades e associações em prol das florestas foram criadas no Brasil, sendo uma das mais recentes a Indústria Brasileira de Árvores – IBÁ, a qual representa 61 empresas e nove entidades estaduais.

O eucalipto, em pouco mais de um século, desde sua introdução em território brasileiro, já atinge elevadas taxas de produtividade e qualidade, resultado da adaptação ao clima e solo, da evolução do melhoramento genético, dos métodos silviculturais e investimentos em tecnologia. Em 2013 já se tinha atingido 5,1 milhões de hectares de florestas plantadas (ABRAF, 2013).

Com a matéria prima provinda dessas florestas, o Brasil produziu em 2014 aproximadamente 16,5 milhões de toneladas de celulose e 10.4 milhões de toneladas de papel, sendo o principal destino as exportações para América Latina, Europa, América do Norte, África, Ásia, Oceania e China (IBÁ, 2015).

Além da produção de celulose e papel, o eucalipto é largamente utilizado no processo de fusão do ferro gusa, como energia em termoelétricas, na produção de madeira serrada e laminada, na movelaria e ainda como dormente em manutenções ferroviárias.

A amplitude dos investimentos econômicos no setor de florestas plantadas cresceu expressivamente e com isso a necessidade de conhecer a dinâmica de crescimento e produção florestal com mais afinco, convergindo para um manejo equalizado e sustentável. Nesse contexto, o desenvolvimento da biometria e dos métodos de amostragem constituíram importantes e fundamentais instrumentos para avaliação fidedigna dos estoques florestais e de sua variabilidade comportamental.

Segundo Péllico Netto e Brena (1997), a teoria de amostragem se fundamenta em Métodos, Processos e Sistemas de amostragem. O método define o critério probabilístico que os indivíduos de uma dada população são selecionados em uma unidade amostral. Dentro desse universo, o método de Área Fixa (AF) desenvolvido pelos suíços, cujo critério de seleção dos indivíduos é efetuado com probabilidade proporcional à área (PPA), é hoje o mais difundido no Brasil e no mundo. Ainda, podem ser citados como importantes: o método do professor austríaco Walter Bitterlich, com PP à área basal; Strand com PP ao diâmetro para

estimar área basal e densidade e PP à altura para estimar volume e densidade; Prodan com PP à distância; e de Grosenbaugh com PP a um tamanho (predição), também denominado de 3-P.

Os processos de amostragem possibilitam inferências sobre as estruturas que um conjunto de unidades amostrais é distribuído na população, seja de forma aleatória, sistemática ou mista e seus critérios temporais, de única ocasião ou sucessivas ocasiões, nas quais os arranjos de amostragens independentes, com repetição total, parcial ou dupla são considerados.

Os sistemas de amostragem, por sua vez, incorporam a junção de métodos e/ou processos de amostragem, estruturando o uso de acordo com a finalidade a que se propõe o inventário.

O desenvolvimento e a melhoria das práticas de manejar florestas tiveram início no final da Idade Média em alguns países, como, por exemplo, o continente Europeu, o qual já dependia fortemente da avaliação paralela de técnicas de inventário e metodologia estatística, em esquemas de amostragem específicos (MANDALLAZ, 2008).

Recentemente, as teorias estatísticas e de avaliação das florestas foram beneficiadas pelo advento tecnológico, que propiciou a incorporação de uso dos sensores remotos, composições geoespacializadas de variáveis, escaneamento a laser, infravermelho, modelagens mais flexíveis e dinâmicas, com fundamentação biológica e também uso da inteligência artificial, via construção de sistemas de redes neurais.

Esses avanços visam, além do objetivo principal de atender a melhoria dos estimadores de produção, reduzir os custos da amostragem envolvendo avaliações das florestas, pois esse é foco importante e muitas vezes o fator restritivo para a elaboração de inventários representativos da população.

Este trabalho se fundamenta basicamente nesse pilar, visando produzir estimadores precisos dos parâmetros que descrevem e quantificam a floresta e atendendo às necessidades de cunho gerencial, corporativo e estratégico das empresas florestais sem ferir ou inviabilizar os custos de sua realização.

Na realidade cotidiana das empresas florestais é comum solicitar estimadores médios por talhão (que é geralmente a unidade de divisão mínima da população), ou por agrupamentos desses, com espécie, densidade e idade

semelhantes, denominados de compartimentos ou estratos. Tal necessidade, muitas vezes, leva à obtenção de estimativas tendenciosas, visto que uma baixa intensidade amostral é utilizada atualmente.

Outra necessidade de suma importância é detectar as capacidades produtivas das florestas, devido à necessidade de um planejamento adequado dos ciclos de produção, das estratégias e práticas de manejo a serem elaboradas e propostas. A capacidade produtiva pode ser denominada de índice de local ou índice de sítio (CAMPOS; LEITE, 2006).

A predição indireta mais assertiva da produtividade potencial de uma floresta, de uma dada espécie, em um ciclo específico, é o índice de sítio, definido pela altura de árvores da população que sempre tenham sido dominantes, codominantes e sadias, em uma idade de referência (CLUTTER *et al.*, 1983; CASTILLO LÓPEZ *et al.*, 2013).

Uma correta predição da altura dominante, baseado em modelos de índice de sítio é essencial para modelar o crescimento e a produção florestal com precisão. Estudos também comprovam redução expressiva da variância e, conseqüentemente, do erro amostral quando a variável sítio é incorporada nos processos de amostragem estratificada (PÉLLICO NETTO *et al.*, 2014).

Para Cieszewski e Strub (2008) a modelagem de predição da altura dominante tem evoluído constantemente desde o surgimento do modelo de Schumacher (1935; 1939), citando os autores: Coile e Schumacher (1964), Baley e Clutter (1974), Curtis *et al.* (1974); Bailey (1980), Newnham (1988), Huang (1994), Cieszewski e Bailey (2000) e Krumland e Eng (2005).

Esses estudos desenvolveram métodos que foram amplamente difundidos no Brasil, sendo os mais conhecidos: curva guia, diferenças algébricas e predição dos parâmetros (SCOLFARO, 1998).

Neste trabalho será abordado o conceito de um método ainda não difundido ou empregado no Brasil, chamado de *Generalized Algebraic Difference Approach* (GADA), proposto inicialmente por Cieszewski e Bailey (2000), sendo suas características principais a possibilidade de gerar curvas de sítio dinâmicas, polimórficas, com diferentes assíntotas e mais flexíveis, visto que mais de um parâmetro pode ser específico do sítio (CASTILLO LÓPEZ, 2013).

A classificação de sítio tradicional, indiferente do método, leva em

consideração a média específica de um ponto amostral avaliado, não levando em consideração possíveis correlações entre unidades amostradas na região de sua vizinhança (BOGNOLA *et al.*, 2009; MELLO, 2004).

Nesse contexto o uso das técnicas de geoestatística ganha expressivo espaço funcional, visto que possíveis dependências espaciais existentes entre unidades amostradas possam ser explicadas de forma integrada. Ainda, como maior vantagem, locais não amostrados podem receber sem tendenciosidade atribuição quantitativa ou qualitativa, de forma correlacionada e interpolada dos pontos amostrados, geralmente por meio do emprego de técnicas de regressão linear múltipla.

Essa ferramenta traz vantagens à modelagem do sítio e a processos de amostragem sobre distintas formas, permitindo a definição de espacialização geográfica de variáveis de interesse, quantificação de áreas, estratificação mais aprimorada da população, melhoria dos estimadores estatísticos e redução de erros amostrais, gerando ainda ferramentas para demarcação física das unidades de produção e do manejo silvicultural direcionado ou de precisão.

Em algumas empresas no Brasil surgiu uma ideia variante ao método de área fixa, cujas unidades amostrais – UAs passam a ser variáveis porque são tomadas seis ou mais linhas no plantio com 10 plantas na linha (60 covas, aproximadamente), por questões de consistência estatística dos estimadores amostrais, permitir correção de possíveis erros sistemáticos de espaçamento, evitar totalmente a ocorrência de árvores marginais, dado que no método de amostragem de Área Fixa a tratativa desse problema é feita de maneira aproximativa. Com essa configuração, um novo método de amostragem é desenvolvido, cuja seleção dos indivíduos na população é efetuada com probabilidade proporcional a uma área média variável de ocupação de uma árvore na unidade amostral, denominada de Amostragem com Probabilidade Proporcional à Área Variável (PPAV).

Péllico Netto (1979), no desenvolvimento de sua tese de doutorado propôs o uso de um processo de amostragem em rodízio, o qual visa concomitantemente à aplicação do processo de amostragem estratificada e a redistribuição da intensidade amostral global em apenas 50% da área inventariada em cada ocasião. Tal sugestão permaneceu sem aplicação prática no Brasil até o ano de 2010, quando então foi implantada com sucesso no sul do Brasil, em povoamentos de *Pinus* na

região do planalto norte catarinense e posteriormente no extremo norte do Tocantins, em povoamentos de *Eucalyptus* sp., ambos pela empresa Brasil Florestal.

Considerando a abordagem do sítio, o objetivo é: 1) Atualizar a literatura sobre os métodos de modelagem da altura dominante; 2) Apresentar os ganhos de eficiência na modelagem com o método das diferenças algébricas generalizadas (GADA) propostas por Cieszewski e Bailey (2000), quando comparado com o método das diferenças algébricas e curva guia; 3) Aplicar a geoestatística como ferramenta de apoio à classificação do sítio e delimitação geográfica das classes e suas respectivas áreas.

Com o método de amostragem de área variável, os objetivos são: 1) Apresentação conceitual e matemática deste método alternativo de amostragem; 2) Aplicação prática a dados coletados com base na PPAV.

Com relação à amostragem em rodízio, este trabalho é concebido para possibilitar: 1) A apresentação conceitual e matemática deste importante e inovador processo de amostragem; 2) Permitir o comparativo de eficiência e precisão, quando comparado aos atuais métodos utilizados pelas empresas florestais; 3) Comparar a eficiência desse processo de amostragem frente à modelagem do crescimento e produção florestal em nível de povoamento;

Para melhor compreensão, este estudo foi elaborado em 3 capítulos: 1) Classificação de sítios para *Eucalyptus* sp. em região tropical do Brasil; 2) Apresentação conceitual e aplicação do método de Amostragem com Probabilidade Proporcional à Área Variável; 3) Apresentação conceitual e aplicação do processo de amostragem em Rodízio.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 CLASSIFICAÇÃO DA CAPACIDADE PRODUTIVA

2.1.1 Evolução histórica, conceitos e aplicações

O sítio tem sido amplamente utilizado como variável nos modelos de crescimento e produção florestal, sendo importante por expressar um conjunto de fatores ecológicos (climático, edáfico e biológico) Scolforo (1998).

Segundo Weiskittel *et al.* (2011), a qualidade dos sítios florestais é definido pelos fatores físicos e biológicos que caracterizam o suporte do crescimento das árvores. Duas são as formas usadas para estudar a evolução dos sítios florestais: Fitocêntrico e Geocêntrico, sendo essas divididas em abordagens diretas e indiretas (TABELA 1.1).

TABELA 1.1 – MÉTODOS UTILIZADOS PARA AVALIAR A PRODUTIVIDADE DO SÍTIO FLORESTAL.

Método	Abordagem Direta	Abordagem Indireta
Fitocêntrico	Mensuração do Volume	Índice de sítio; tipo do habitat; vegetação indicadora.
Geocêntrico	Textura do solo; umidade do solo; radiação disponível.	Aspectos: elevação; latitude; longitude.

Fonte: Weiskittel *et al.* (2011), Adaptado de Skovsgaard e Vanclay (2008).

Para Husch *et al.* (1923) os fatores ambientais do sítio podem ser agrupados como:

- Edáfico: profundidade do solo e textura, nível de nutrientes, pH, umidade e drenagem;
- Climático: temperatura do ar, precipitação, umidade, duração da estação de crescimento, luz e vento;
- Topográfico: altitude, ângulo de inclinação, aspectos de posição e comprimento;
- Competição: outras árvores e vegetação.

Em suma, pode-se afirmar que quanto mais completas forem as análises, melhores serão os resultados preditivos, sendo possível o uso de métodos de forma

conjunta (fitocêntrico e geocêntrico). Exemplos são obtidos em Maestri (2003), o qual associou variáveis ambientais (precipitação pluviométrica, variação da evapotranspiração potencial, temperatura máxima e mínima) à função de Chapmann-Richards (Richards 1959, Chapman 1961) proposta inicialmente por Bertalanffy (1949) para explicar o crescimento e a produção de madeira em povoamentos de *Eucalyptus grandis* no norte o Espírito Santo e Sul da Bahia, obtendo ganhos da ordem de 30,1%, 21,9% e 36,0% na redução do erro padrão das estimativas, para predição do incremento anual, altura dominante e da área basal, respectivamente.

Tratando especificamente do contexto fitocêntrico, o sítio florestal é mais comumente determinado por meio da coleta de alturas dominantes em diferentes idades, podendo ser citadas como fontes de dados: as parcelas temporárias, parcelas permanentes e análise de tronco.

Segundo Burkhardt e Tomé (2012), o crescimento em altura dominante é correlacionado com o volume da produção, ademais essa variável não é fortemente afetada pela densidade e tratamentos de desbastes, sendo, portanto, uma base confiável e indispensável de informação.

O método da curva guia, o qual gera curvas estáticas e anamórficas, tem sido amplamente utilizada no Brasil e no mundo. Esse método permite o ajuste do sítio com a coleta de altura / idade sem a necessidade de repetição de mensuração dos mesmos indivíduos, sendo possível o uso de dados provenientes de parcelas temporárias ou de permanentes de única medição.

A maioria dos modelos de índice de sítio existentes e aplicados no passado no estado da Califórnia foi desenvolvida por técnicas tradicionais anamórficas de curva guia (KRUMLAND; ENG, 2005), usando único par altura / idade em árvores individuais ou médias de unidades amostrais. Esses tipos de modelos são conhecidos a priori como potencialmente tendenciosos, devido à possibilidade de que o índice local possa ser correlacionado com a idade da unidade amostral (KING, 1966, KRUMLAND; ENG, 2005).

Curtis (1964) introduziu o uso da análise de tronco (ANATRO) para reconstituir os pares de altura / idade em coníferas nos Estados Unidos. Essa fonte de dados tem sido utilizada amplamente em diversos locais do mundo (Noroeste do México por CASTILLO LÓPEZ, 2013; Noroeste da Espanha por DIÉGUEZ-ARANDA,

2005; Noroeste da Galícia, Península Ibérica por DIAZ-MAROTO 2010).

Métodos que utilizam análise de tronco e outras formas de medidas repetidas sobre árvores individuais são geralmente considerados como sendo superiores, imparciais e produzem uma avaliação mais precisa do desenvolvimento e crescimento em altura dominante (CURTIS, 1964; KRUMLAND; ENG, 2005).

Para Andrade (2004), o método da curva guia somente deve ser utilizado em situações em que não haja dados de remedições, proveniente de parcelas permanentes e análises de tronco.

Scolforo (1993) retrata características desejáveis na construção das curvas de sítio com ajustes pelo método das diferenças algébricas, sendo os mais relevantes: 1) gerar curvas polimórficas ou anamórficas; 2) invariante, ou seja, independentes da escolha da idade de referência; 3) na idade de referência o sítio é igual à altura dominante, não necessitando de correções ou ajustes.

Marinheski *et al.* (2015) utilizaram concomitantemente os métodos da curva guia, geoestatística com aplicação da krigagem ordinária e posteriormente análise de tronco, para gerar estimativas da capacidade produtiva de sítios de *Pinus taeda* no sul do Brasil. O conceito baseou-se em determinar previamente a classificação de sítios por meio de dados de parcelas temporárias (curva guia), posterior estratificação das áreas via aplicação geoestatística, utilizada para delimitar os limites das capacidades produtivas e permitir que as árvores selecionadas para análise de tronco englobassem toda variabilidade da população e sua distribuição geográfica. Ao término foi ajustado o modelo de Chapmann – Richards (RICHARDS, 1959; CHAPMAN, 1961) modificado por Amaro *et al.* (1998) para gerar curvas polimórficas de sítio com uso dos dados da ANATRO, obtendo ganhos de 35% em precisão do erro padrão das estimativas (Syx%), quando comparado ao método da curva guia.

Para Andrade 2004, conceitos desejáveis para a construção de curvas de sítio (polimorfismo ou anamorfismo, idade-base invariante e altura dominante igual ao sítio na idade de referência) são alcançados com ajustes pelo método das diferenças algébricas, com destaque para os modelos não lineares e com fundamentação biológica de Chapmann – Richards modificado por Clutter *et al.* (1983) e Amaro *et al.* (1998).

Burkhardt e Tennent (1977) realizando classificação de sítios em

povoamentos de *Pinus radiata* na Nova Zelândia dividiram a instalação das parcelas permanentes levando em considerações 8 agrupamentos de solos em diferentes regiões. Com essa configuração os autores ajustaram curvas polimórficas com diferentes padrões de escala e assíntotas, identificando, inclusive, que os padrões das curvas de sítio se distribuíam de forma não disjuntas (FIGURA 1.1). Os autores ainda destacam a importância de essas informações serem concomitantemente avaliadas no processo de construção da modelagem de sítio.

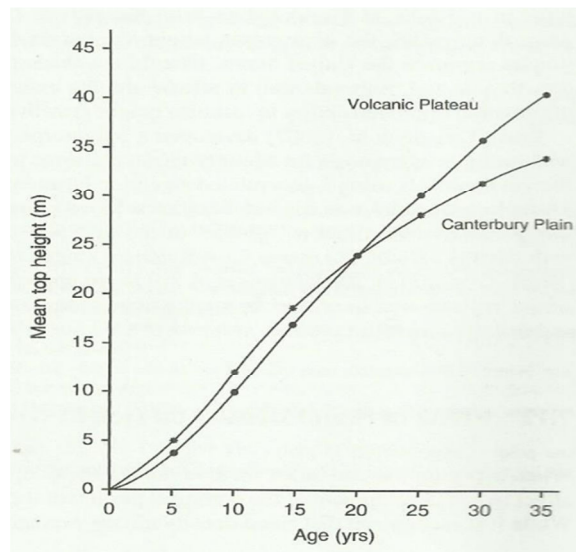


FIGURA 1.1 – CURVAS DE ÍNDICE DE SÍTIO DE 24M AJUSTADAS POR BURKHART E TENNENT, (1977) PARA A REGIÃO DO PLATÔ VULCÂNICO E PLANÍCIE CANTERBURY NA NOVA ZELÂNDIA.

FONTE: Adaptado de Burkhart e Tomé (2012).

Para Cieszewski e Strub (2008), a modelagem de predição da altura dominante tem evoluído constantemente desde o surgimento dos modelos de Schumacher (1935; 1939), citando os autores: Coile e Schumacher (1964), Bailey e Clutter (1974), Curtis *et al.* (1974), Bailey (1980), Newnham (1988), Huang (1994), Amaro *et al.* (1998), Cieszewski e Bailey (2000) e Krumland e Eng (2005). Os autores geraram a figura 1.2, que referencia temporalmente a evolução, métodos e flexibilidade dos modelos. Para o *ranking* de flexibilidade os autores definiram no eixo das ordenadas: o valor 1 para os modelos anamórficos; 2 para os modelos polimórficos; 3 para os modelos polimórficos avançados e 4 para os modelos polimórficos avançados com funções de base exponencial. Dessa forma, quanto mais flexível o modelo, melhor os estimadores gerados.

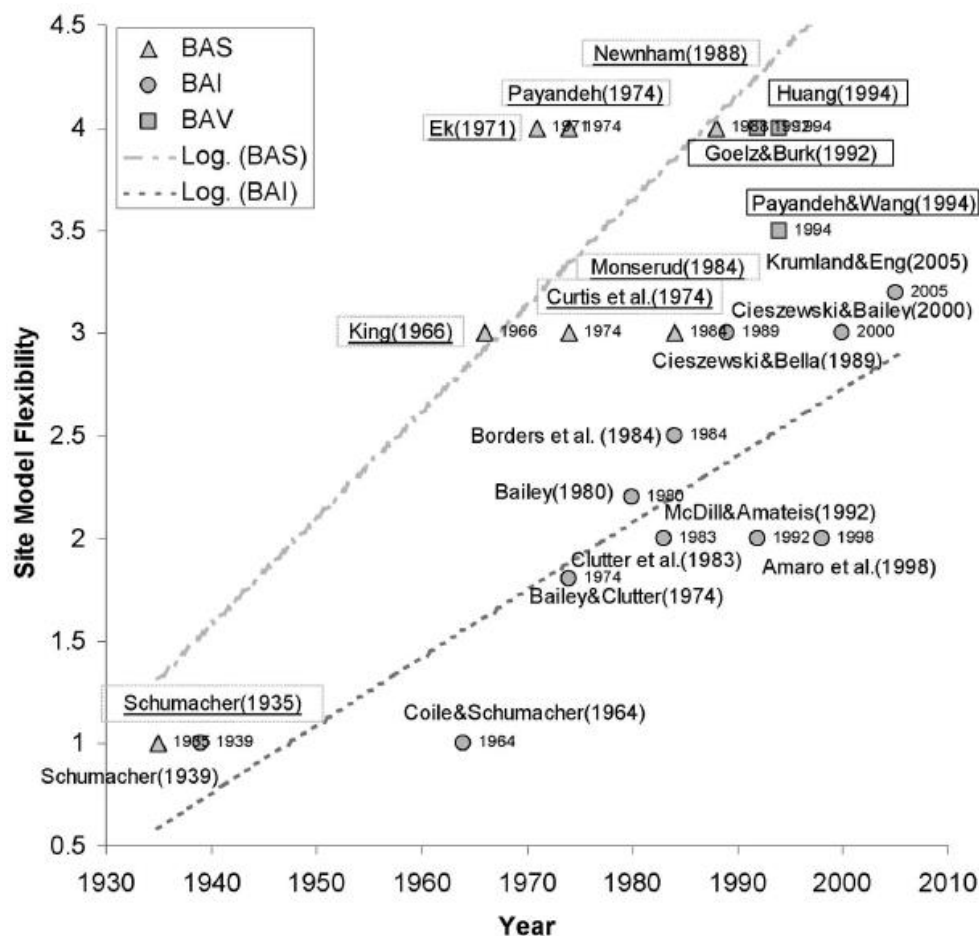


FIGURA 1.2 – EVOLUÇÃO HISTÓRICA DOS MODELOS ESTÁTICOS (QUADRO TRACEJADO E CITAÇÕES SUBLINHADAS); EQUAÇÕES DE SÍTIO DINÂMICAS COM IDADE-BASE INVARIANTE (CITAÇÕES LIMPAS); EQUAÇÕES DE SÍTIO COM IDADE-BASE VARIANTE (CITAÇÕES EM QUADRO SÓLIDO).

FONTE: Cieszewski e Strub (2008).

Cieszewski e Bailey (2000) introduziram o método das diferenças algébricas generalizadas (*Generalized Algebraic Difference Approach – GADA*), derivando funções não lineares e generalizando os parâmetros originais de modelos biomatemáticos consagrados, como: Chapman-Richards, Korf e Hossfeld.

Essa metodologia difundiu-se rapidamente pelo mundo: Krumland e Eng (EUA, 2005); De Los Santos-Pousadas *et al.* (México, 2006); Diéguez-Aranda *et al.* (Espanha, 2006); Cieszewski e Strub (EUA, 2008); Díaz-Maroto *et al.* (Península Ibérica, 2010); Castillo López (México, 2013); Senyurt e Ercanli (Turquia, 2013); Tamarit-Urias *et al.* (México, 2014) e Nigh (Canadá, 2015), dado sua maior flexibilidade, maior precisão, ser invariante quanto à escolha da idade de referência, por gerar diferentes assíntotas e curvas de crescimento polimórficas.

O uso de dados de unidades amostrais permanentes ou análise de tronco

(ANATRO) se faz necessário para promover o ajuste dessa metodologia, dada a necessidade de compor o ajuste com base nas taxas de crescimento.

2.2 GEOESTATÍSTICA

2.2.1 Evolução histórica, conceitos e aplicações na área florestal

De acordo com Mandallaz (2008) a geoestatística nasceu da problemática da variabilidade espacial de ensaios experimentais de campo. Os estudos desenvolvidos na Ecole des Mines de Paris, por Matheron (1965), voltada para prospecção mineira e indústria petrolífera, é considerada a fundamentação teórica e a orientação matemática da geoestatística.

Mandallaz (2008) complementa que atualmente a geoestatística é utilizada na mineração, petrologia, física do solo, meteorologia, oceanografia e engenharia florestal.

Segundo o mesmo autor, vários livros tratam do assunto: Christensen (1990), Cressie (1991), Wackernagel (2003) e Schabenberger e Christensen (2005).

Para Yamamoto e Landim (2013), os conceitos de geoestatística podem ser aplicados tanto à variáveis contínuas como à discretas, envolvendo uma gama de aplicação dessa metodologia.

Especificamente no campo da engenharia florestal, diversos foram os trabalhos que enfatizam a estrutura espacial associada às variáveis dendrométricas. Para eucalipto podem ser citados: Melo *et al.* (2005), Kanegae Junior *et al.* (2007), Rosa Filho *et al.* (2011).

Mandallaz (2008) enfatiza que as unidades amostrais de um inventário florestal não devem ser tratadas como independentes no espaço, indicando o uso da geoestatística como ferramenta eficaz na delimitação espacial das variáveis dendrométricas e na estratificação, permitindo a redução de custos da atividade e aumento da precisão do processo de amostragem.

O fenômeno espacial a ser estudado depende de uma amostra representativa da população, atendendo uma dada forma de distribuição, que pode ser aleatória simples, aleatória estratificada ou sistemática e da quantidade de pontos de amostragem.

Yamamoto e Landim (2013) comentam que, preferencialmente, a amostragem sistemática deve ser utilizada, dado sua distribuição uniforme em distância e abrangência geográfica do domínio em estudo. Ainda, os autores comentam que a distribuição regular dos pontos amostrais permite calcular diretamente o variograma, com base na fórmula:

$$\begin{aligned}\gamma(h) &= \frac{1}{2} E\{[Z(x+h) - Z(x)]^2\} \\ &= \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n [Z(x+h) - Z(x)]^2\end{aligned}$$

Em que: $\gamma(h)$: semivariograma; $Z(x+h) - Z(x)$: um par de coordenadas que representa o diagrama de dispersão.

Para amostragens irregulares, é necessário definir parâmetros adicionais à distância e direção, para que a malha seja regularizada (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Além do processo de distribuição, a intensidade amostral expressa importante inferência sobre os cálculos geoestatísticos. Soares (2006) afirma que é razoável supor que cada ponto no espaço está relacionado, de algum modo, com valores obtidos de seus vizinhos mais próximos, sendo que essa relação é maior quanto menor for a distância entre os pontos.

Pelissari (2015) utilizou pontos de uma rede sistemática de amostragem de inventário florestal contínuo em povoamentos de *Tectona grandis* (Teca) e empregou a Krigagem Indicatriz e Cokrigagem Ordinária para: relação hipsométrica, capacidade produtiva (índice de sítio) e volume, obtendo como resultado dependências espaciais moderadas para as idades de 5 anos e forte dependência espacial aos 8 anos, concluindo que as metodologias foram eficazes para estimar tais variáveis dendrométricas. Ademais, o autor menciona a possibilidade das técnicas de geoestatística auxiliarem na redução de custos do inventário florestal, na silvicultura e manejo de precisão, bem como na maximização da produtividade.

Segundo Yamamoto e Landim (2013) é possível prever o comportamento espacial de uma variável regionalizada: $\{Z(x_i), i = 1, n\}$, coletando “n” pontos distribuídos em um dado domínio. Aplicando as definições das funções de

covariância e variograma, verifica-se que são necessários dois pontos a uma dada distância $h = x_1 - x_2$ e considerar que cada uma delas é uma realização diferente, para tornar possível a inferência estatística das funções.

O termo variograma $2\gamma(h)$ refere-se à variância da diferença de pares de pontos separados por h . Como o cálculo para encontrar a média das diferenças ao quadrado é dividido por dois, o termo semivariograma $\gamma(h)$ foi diferenciado para evitar confusões terminológicas (YAMAMOTO; LANDIM, 2013).

Basicamente, a função variograma ($2\gamma(h)$) ou semivariograma ($\gamma(h)$) definem a variância existente entre os pontos amostrados, o qual apresenta a tendência de atingir seu máximo à medida em que h aumenta. Quando esta condição é satisfeita, a função variograma atinge a variância máxima do domínio em estudo, denominada patamar. No entanto, dependendo da associação espacial da variável em estudo, a variância poderá aumentar de forma invariante à distância h , configurando os gráficos sem patamar.

De acordo com Pelissari (2015) os modelos de variogramas com patamar: Esférico, Exponencial e Gaussiano explicam a maioria dos fenômenos espaciais. De acordo com o mesmo autor, um semivariograma é composto estruturalmente pelo efeito pepita (C_0), correspondente a variação ao acaso e/ou os erros de amostragem em razão de sua escala; o patamar ($C_0 + C$), que indica os valores do semivariograma estabilizados de forma semelhante à variância à priori do conjunto de dados; a contribuição (C), resultante da diferença entre o patamar e efeito pepita; e o alcance, que define a distância onde o semivariograma iguala-se ao patamar, representando, portanto, o limite da dependência espacial (FIGURA 1.3).

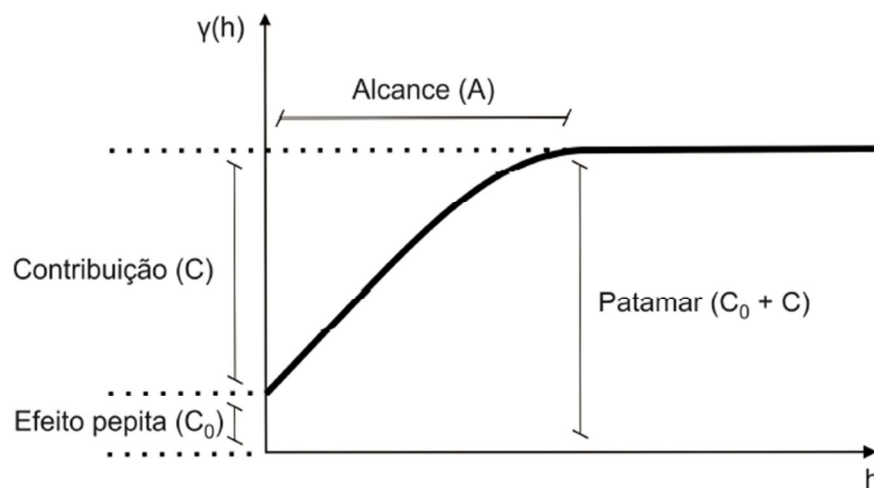


FIGURA 1.3 – COMPONENTES QUE REPRESENTAM UM SEMIVARIOGRAMA
FONTE: Pelissari (2015).

2.3 TEORIA DA AMOSTRAGEM

2.3.1 Métodos de Amostragem

Vários métodos de amostragem são conhecidos na literatura, nos quais o destaque teórico entre eles é o critério probabilístico de seleção das árvores que vão participar da unidade amostral.

Este campo da teoria de amostragem foi inovado a primeira vez por Bitterlich, quando ele propôs uma unidade amostral na qual as árvores são selecionadas com probabilidade proporcional ao quadrado dos diâmetros tomados à altura do peito ($d_{1,30}^2$), a partir de um ponto de visada (BITTERLICH, 1948). Seu método de amostragem passou a ser denominado, principalmente nos Estados Unidos, como Amostragem por Pontos (*Point Sampling*).

Outros autores o seguiram variando o critério probabilístico de seleção das árvores, distinguindo-se entre eles Strand (1958), com a proposta de amostrar as árvores ao lado de uma linha de comprimento L , demarcada dentro da floresta, cuja seleção se faz com probabilidade proporcional ao seu diâmetro ($d_{1,30}$), para a obtenção da estimativa da área basal e proporcional à altura das árvores (h), para a obtenção da estimativa do volume por hectare; Prodan (1965) propôs o método de seleção das árvores proporcional ao quadrado do raio da 6ª árvore tomada em uma unidade amostral circular (r_6^2).

Esses métodos amostrais distinguem-se pelo critério probabilístico de seleção das árvores que participam das respectivas unidades amostrais propostas e foram genericamente denominados de amostragem com seleção probabilística proporcional a um tamanho (ppa), e têm sido atribuídos aos autores que os desenvolveram.

Destacam-se, ainda, na literatura algumas concepções propostas para estudos ecológicos espaciais das espécies, como o método dos quadrantes, no qual a seleção probabilística das árvores é feita proporcional ao raio da árvore mais próxima do centro de um círculo r_i , acrescida da restrição de aplicação do critério em quadrantes, ou seja, a unidade amostral circular é fracionada em quatro

subunidades, configurando-se subamostragem e, neste caso, eles formam um conglomerado com um indivíduo por subamostragem (COTTAM; CURTIS, 1956).

É notório, tanto no Brasil, como em outras partes do mundo, que o método de área fixa tem sido mais amplamente difundido, dado que sua utilização em levantamentos florestais se dá em função da precisão, correlação, maior estabilidade dos estimadores e por ser menos restritivo, quando comparado com o método de Bitterlich, Prodan e Strand. Por exemplo, se qualquer uma dessas unidades amostrais for proposta como parcela permanente em inventários florestais contínuos, pode gerar restrições, como modificações da participação das árvores na unidade amostral em medições sucessivas, dificuldades de caracterização de alturas dominantes, superestimativas em área basal e volume por hectare, resultantes, na maioria das vezes, pela baixa participação de indivíduos em cada unidade de amostra, entre outras.

Assim como os demais métodos já descritos, no método de Área Fixa as árvores são selecionadas com probabilística proporcional a uma área (ppa), que neste caso é proporcional à área da Unidade Amostral (UA).

Detalhamento teórico e aplicativo dos métodos amostrais anteriormente mencionados encontram-se apresentados em Péllico Netto e Brena (1997) e Kangas e Maltamo (2006).

2.3.2 Processos de Amostragem

Os processos de amostragem possibilitam inferências sob a abordagem de um conjunto de unidades amostrais, como são lançadas na população, seja de forma aleatória, sistemática ou mista e seus critérios temporais, de única ocasião ou sucessivas ocasiões, nos quais os são apresentados de amostragens independentes, com repetição total, parcial ou dupla.

No Brasil, o processo de amostragem aleatória tem sido amplamente utilizado para inventários florestais em florestas nativas e plantadas. Nesse processo, todas as unidades amostrais são sorteadas segundo critérios probabilísticos (PÉLLICO NETTO; BRENA, 1997), sendo que todas as n unidades da população têm as mesmas chances de serem selecionadas (SOARES *et al.*, 2006b). Ademais, esse processo pode incluir fatores de proporcionalidade, como a

área do compartimento, estrato ou talhão a ser inventariado. Quando essa premissa não é satisfeita, as ponderações podem ser tendenciosas, não representativas da verdadeira média da população, quando diferentes agrupamentos de dados de um mesmo local poderão resultar em valores desiguais.

Outro fato restritivo do processo aleatório diz respeito à classificação de sítios e o emprego das técnicas de geoestatística, dado a probabilidade de não ser recoberta todo o domínio em estudo, criando áreas com modelagem espacial subjetiva.

Na amostragem sistemática, somente a primeira unidade amostral é sorteada aleatoriamente, sendo as demais alocadas em um rígido padrão de distribuição, especializadas por uma distância k (m). O recobrimento igualitário de todo domínio em estudo é umas principais vantagens (YAMAMOTO; LANDIM, 2013). Nesse processo, independentemente da combinação e agrupamento do conjunto de dados, as médias resultarão em valores semelhantes, dado que o critério de proporcionalidade ao tamanho é satisfeito.

Um exemplo da flexibilidade de uso desse processo de amostragem é encontrado na metodologia do inventário florestal nacional (SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO, 2008), o qual permitirá recobrir, em grid sistemático de 20x20km toda extensão territorial do Brasil, englobando diferentes biomas e formações florestais.

2.3.3 Sistemas de Amostragem

Os sistemas de amostragem por sua vez, incorporam a junção de métodos e/ou processos de amostragem, estruturando o uso de acordo com a finalidade a que se propõe o inventário. Exemplos de sistemas de amostragem em empresas florestais brasileiras podem ser obtidas em Sanquetta *et al.* 2014, quando o autor apresenta um capítulo específico dos inventários florestais nas empresas: Klabin S/A, Valor Florestal, Eucatex Florestal, Suzano Papel e Celulose, International Paper Arauco Florestal Arapoti S/A.

2.3.4 Inventários Florestais Contínuos

Os Inventários Florestais Contínuos (IFC) são instrumentos técnicos imprescindíveis para substanciar informações cruciais demandadas diariamente na atividade técnica das empresas florestais. Elas englobam grande espectro de avaliações concernentes ao caráter dinâmico da população florestal.

O IFC constitui, portanto, uma atividade permanente em todo o ciclo produtivo da floresta, devido à necessidade de monitoramento de crescimento da produção florestal, da evolução do estoque, da mortalidade de plântulas e suas consequências na densidade, da qualidade dos sítios para a produção, entre outros.

Bickford (1963) especificou com muita clareza que o IFC é um instrumento fundamental para o planejamento das operações de exploração florestal, para se efetuar transações de compra e venda de madeira, para a localização de estradas ligando as unidades de plantio e para efetivação de tantas outras atividades de manejo da unidade produtiva e conclui afirmando que o IFC é a base para a utilização racional dos recursos florestais e para orientar o manejador em suas inúmeras decisões.

A estrutura técnica para implantação e condução do IFC pressupõe conhecimentos especializados da teoria de amostragem, pois essa constitui a espinha dorsal desse trabalho. Os suíços introduziram em 1890 o Processo de Amostragem com Repetição Total de parcelas – ART, conhecido mais comumente como Parcelas Permanentes, visando à avaliação do crescimento volumétrico por unidade de área, bem como o crescimento e mudanças em nível individual das árvores (SCHIMID, 1971).

A maioria das empresas, senão sua totalidade aceitou plenamente implantar essa metodologia nos seus IFCs aqui no Brasil, porém ao longo das últimas décadas não têm incorporado as inovações que surgiram para o aprimoramento desse processo amostral.

Os novos enfoques surgiram da percepção de que a precisão dos estimadores amostrais poderá ser melhorada, sem aumentar custos na amostragem. As novas concepções metodológicas consideram aspectos relevantes na tratativa das populações florestais, principalmente no que concerne aos níveis de estratificação. Até o momento as empresas estratificam as populações florestais por

espécie e por idade e tratam uma unidade anual de plantio – UAP como sendo a subpopulação básica para a distribuição das parcelas permanentes. Ademais, a alocação das parcelas permanentes dentro da UAP pressupõe atingir uma densidade amostral compatível com a disponibilidade financeira da empresa.

Trabalhos recentes nas empresas florestais mostram que, quando talhões dentro de uma UAP não são considerados como estágio amostral para alocação das parcelas permanentes, tal decisão gera perda de eficiência na obtenção dos estimadores de precisão. Tal avanço conceutivo pressupõe complicações metodológicas, pelo fato de os talhões apresentarem tamanhos diferentes, o que implicará em ajustar a amostragem com proporcionalidade a uma grandeza identificada como a mais apropriada para gerar aumento de precisão nos estimadores da amostragem.

Ainda, Ignácio (2001) considerou, para efeito de aprimoramento dos estimadores de precisão, que a intensidade das parcelas dentro dos talhões fosse efetuada com probabilidade proporcional ao volume delas, o que resultou em expressiva redução dos erros amostrais.

Péllico Netto *et. al.* (2014) demonstrou que se o processo de estratificação for detalhado em nível de sítio e a amostragem distribuída com proporcionalidade às suas respectivas áreas, então a redução dos estimadores efetuados por sítio podem reduzir a variância estratificada em até nove vezes em relação a uma amostragem aleatória efetuada na UAP, conseqüentemente o mapeamento de sítio se torna um requisito fundamental para o aumento da precisão dos estimadores do IFC.

Por fim, com a aplicação da Amostragem em Rodízio – AR proposta por Péllico Netto (1979) pode-se tornar o IFC nas empresas com máxima eficiência, porque a concentração da mesma amostragem efetuada normalmente em cada ocasião será, na implantação dessa nova metodologia, alocada na metade dos talhões, proporcionando, dessa maneira, aumento substantivo de precisão em nível dos talhões sem qualquer aumento de custos na execução do IFC e dispensando plenamente a instalação de inventários pré-cortes.

A implantação dessas inovações nos IFCs das empresas permitirá assegurar qualidade informativa muito superior que a atualmente conseguida e viabilizará o aprimoramento do planejamento da produção e da execução das atividades de manejo dos povoamentos.

3. ÁREAS DE ESTUDO

Para compor os estudos dos três capítulos, foram utilizados duas bases de dados, sendo utilizado para os capítulos 1 e 3 dados de *Eucalyptus* sp localizados em região tropical do Brasil e para o capítulo 2 um povoamento de *Eucalyptus dunnii* localizado em Três Barras SC, região do planalto norte catarinense. Dessa forma, são apresentadas informações que caracterizam cada local de estudo, assim como em cada capítulo, são apresentadas as especificidades de cada aplicação científica.

3.1 BASE DE DADOS PARA O CAPÍTULO I E III

3.1.1 Localização, clima e solo

Dados de um inventário florestal contínuo, localizado nas coordenadas geográficas $-46^{\circ} 48'$ e $-5^{\circ} 51'$ (WGS84), executado entre os anos de 2011 e 2014, provindo de plantios clonais de *Eucalyptus* sp. no estado do Maranhão, Brasil, foram utilizados neste estudo (FIGURA 1.4).

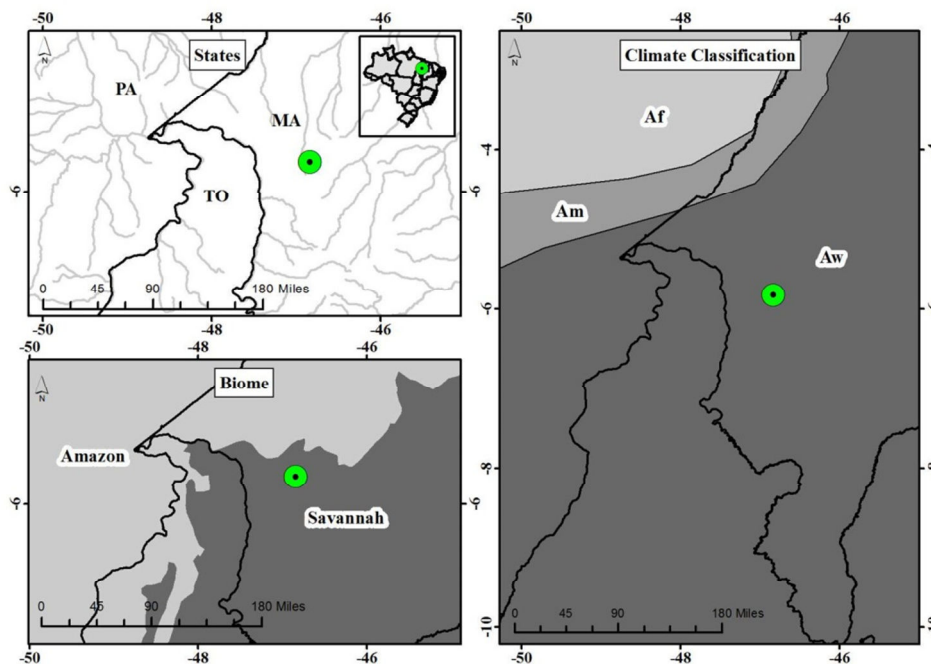


FIGURA 1.4 – LOCALIZAÇÃO, CLIMA E VEGETAÇÃO DO POVOAMENTO DE *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.

FONTE: O autor (2015).

O clima da região é classificado como Aw (Köppen), caracterizado por uma estação chuvosa de outubro a abril e outra seca de maio a setembro, com precipitação média de 1.300 a 1.900 mm ano⁻¹ e temperatura média anual superior a 26°C (ÁLVARES *et al.*, 2013). Os relevos são planos a suavemente ondulados e os solos predominantes são identificados como Latossolos Amarelos e Neossolos Quartzarênicos (EMBRAPA, 2006).

3.1.2 Origem dos dados para classificação do sítio e processo de amostragem em rodízio

Durante os anos de 2011 e 2014 foram coletados dados dendrométricos quantitativos em três Unidades Anuais de Produção (UAP) de *Eucalyptus* sp, plantados durante o período chuvoso dos anos de 2007, 2008 e 2009.

Um total de 845 unidades amostrais (UA) permanentes, de forma retangular, de áreas variáveis (PPVA) na dimensão 6 linhas x 10 covas, alocadas sistematicamente na intensidade de 1 unidade amostral para cada 2,5 hectares, foram mensuradas (TABELA 1.2). Nesse processo amostral, o critério de seleção das árvores se dá com probabilidade proporcional a uma área média de ocorrência dos indivíduos na UA.

TABELA 1.2 – UNIDADES ANUAIS DE PRODUÇÃO (UAP) DE *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.

UAP	Idade (anos)	Nº total de Unidades Amostrais (UA)	Área (hectare)
2,5	Total =>	434	1.085,0
	2,17	33	82,5
	2,25	28	70,0
	2,33	34	85,0
	2,42	103	257,5
	2,50	111	277,5
	2,58	56	140,0
	2,67	35	87,5
	2,75	33	82,5
	2,83	1	2,5
3,5	Total =>	336	840,0
	3,00	8	20,0
	3,08	4	10,0
	3,17	5	12,5

continua

			conclusão
3,5	3,25	22	55,0
	3,33	43	107,5
	3,42	90	225,0
	3,50	56	140,0
	3,58	38	95,0
	3,67	29	72,5
	3,75	40	100,0
	3,83	1	2,5
4,5	Total =>	75	187,5
	4,25	3	7,5
	4,33	32	80,0
	4,42	27	67,5
	4,50	7	17,5
	4,58	6	15,0
Total Geral	=>	845	2.110

FONTE: O autor (2015).

Dada a alta intensidade de amostragem realizada nos quatro anos de mensuração (1:2,5 ha), os dados permitiram elaborar simulações apropriadas com outras intensidades amostrais proporcionais, usualmente utilizadas nas empresas para inventários florestais contínuos e pré-corte, sendo 1:5 ha e 1:10 ha, respectivamente. Tal descrição será tratada especificamente no capítulo 3.

Para cada unidade amostral de área variável (FIGURA 1.5), foram mensuradas duas larguras e dois comprimentos de delimitação da unidade amostral, todas as circunferências, a altura das 10 primeiras árvores e mais as dominantes, conforme conceito de Assmann (1970).

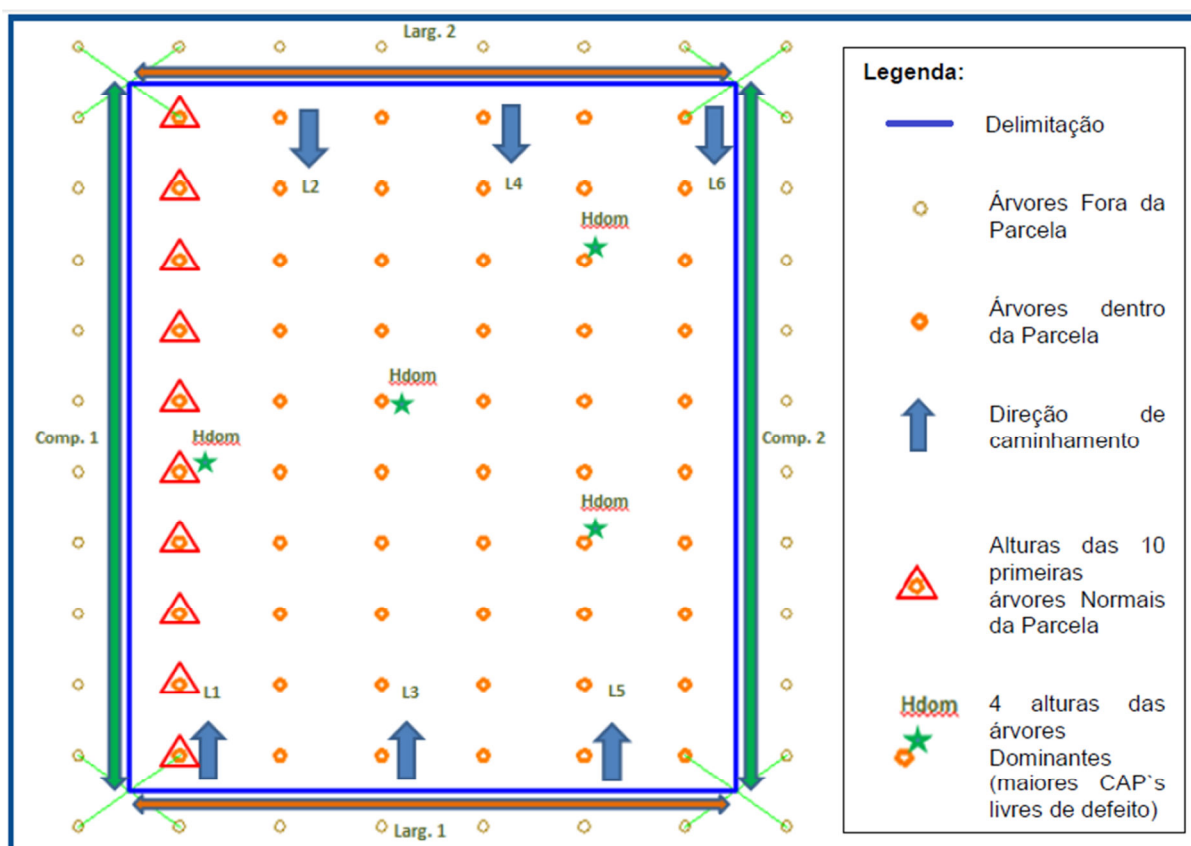


FIGURA 1.5 – ESQUEMA DE INSTALAÇÃO DAS UNIDADES AMOSTRAIS.
FONTE: O autor (2015).

3.1.3 Modelos para estimar a altura total e volume

Foram disponibilizados pela empresa Brasil Florestal, o modelo hipsométrico genérico e de volume ajustados para os povoamentos de *Eucalyptus* sp em estudo, dado a necessidade de compor as estimativas das variáveis altura e volume individual.

3.1.3.1 Modelo para a Altura total

Com os pares de dados de diâmetro e altura obtidos por meio da mensuração das 845 unidades amostrais, durante os quatro anos de inventário contínuo, o modelo genérico adaptado de Scolforo (1998) foi ajustado para representar as alturas das árvores não mensuradas a campo (eq. 1).

$$\ln(ht) = B_0 + B_1 \cdot \ln\left(\frac{1}{d}\right) + B_2 \cdot \ln\left(\frac{dg}{d}\right) + B_3 \cdot \ln\left(d \cdot \frac{G_{\text{basal}}}{h_{\text{dom}}}\right) + B_4 \cdot \ln\left(d \cdot \frac{N_{\text{hectare}}}{h_{\text{dom}}}\right) \\ + B_5 \cdot \ln\left(\frac{1}{h_{\text{dom}}}\right) + B_6 \cdot \ln\left(\frac{dg}{I}\right) + B_7 \cdot \ln\left(\frac{N_{\text{hectare}}}{d}\right) + \varepsilon_i \quad (1)$$

Resultando em:

$$\ln(ht) = -1,1946 \cdot \ln\left(\frac{1}{d}\right) + -0,3652 \cdot \ln\left(\frac{dg}{d}\right) + 0,1456 \cdot \ln\left(d \cdot \frac{G_{\text{basal}}}{h_{\text{dom}}}\right) \\ + -1,0659 \cdot \ln\left(d \cdot \frac{N_{\text{hectare}}}{h_{\text{dom}}}\right) + 0,0021 \cdot \ln\left(\frac{1}{h_{\text{dom}}}\right) \\ + -0,2540 \cdot \ln\left(\frac{dg}{I}\right) + 1,0156 \cdot \ln\left(\frac{N_{\text{hectare}}}{d}\right) \quad (2)$$

Em que:

\ln : Logaritmo neperiano;

ht : Altura total [m];

B_n : Parâmetros a serem ajustados;

d : diâmetro mensurado na i -ésima árvore (cm);

dg : diâmetro quadrático médio da j -ésima unidade amostral (cm);

G_{basal} : Área basal por hectare da k -ésima unidade amostral (m²);

h_{dom} : Altura dominante média da l -ésima unidade amostral (m);

N_{hectare} : Número de árvores por hectare da m -ésima unidade amostral;

I : Idade da floresta na n -ésima unidade amostral (anos); e

ε_i : erro aleatório.

3.1.3.2 Modelo para o volume

O modelo de volume de Schumacher-Hall foi ajustado em sua forma não linear (eq. 2), com dados de cubagens rigorosas realizadas entre os anos de 2012 e 2014 em todos os materiais genéticos estabelecidos no projeto.

$$\text{vol} = B_0 \cdot d^{B_1} \cdot \text{ht}^{B_2} + \varepsilon_i \quad (3)$$

Resultando em:

$$\text{vol} = 0,000044487 \cdot d^{1,737148116} \cdot \text{ht}^{1,176081270} \quad (4)$$

Em que:

vol: Volume (m³);

d: diâmetro mensurado na i-ésima árvore (cm);

ht: Altura total (m);

B_n : Parâmetros a serem ajustados; e

ε_i : erro aleatório.

3.1.4 Validação do Modelo Hipsométrico e de Volume

A validação dos modelos foi realizada pelos indicadores estatísticos do: 1) Coeficiente de Determinação Ajustado (R^2_{ajust}), que resultou em uma correlação de 0,88 para o modelo hipsométrico e 0,99 para o volume; 2) Erro Padrão da Estimativa (Syx%), resultando em 7,20% para o modelo hipsométrico e 6,59% para o volume; 3) Análise gráfica dos resíduos, apresentado em função do diâmetro (FIGURA 1.6).

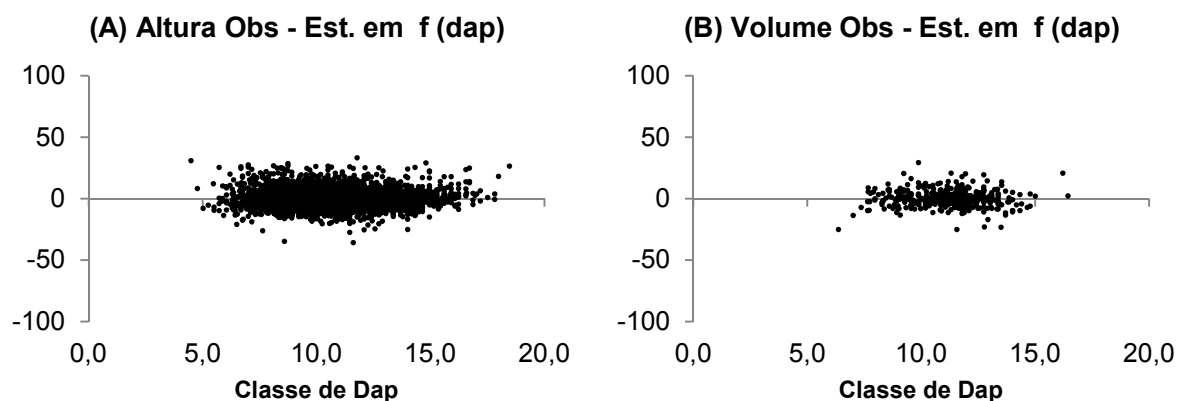


FIGURA 1.6 – DISTRIBUIÇÃO RESIDUAL DO MODELO HIPSONÉTICO (A) E DO VOLUME (B).
FONTE: Brasil Florestal, adaptado pelo autor (2015).

3.2 BASE DE DADOS PARA O CAPÍTULO II

3.2.1 Localização, clima e solo

Dados de um inventário florestal contínuo realizado em 2015 em um povoamento de *Eucalyptus dunnii* Maiden não desbastado com 123,9 hectares, localizado em Três Barras (Latitude: 26° 8'52.94"S e Longitude: 50°20'59.30"O), planalto norte de Santa Catarina foi utilizado para testar o método de amostragem (FIGURA 1.7).

O clima da região do estudo do capítulo 2 é do tipo Cfb, segundo descrição de Köppen, com chuvas bem distribuídas durante o ano e temperatura média do mês mais frio abaixo de 18°C. Originalmente a vegetação local é formada pelo bioma mata atlântica e fitofisionomia ombrófila mista (FIGURA 1.7). O relevo da região é ligeiramente ondulado e os solos são predominantemente argilosos, com boa capacidade de retenção de água e em sua maioria ácidos (PÉLLICO NETTO *et al.*, 2014; EMBRAPA, 2006).

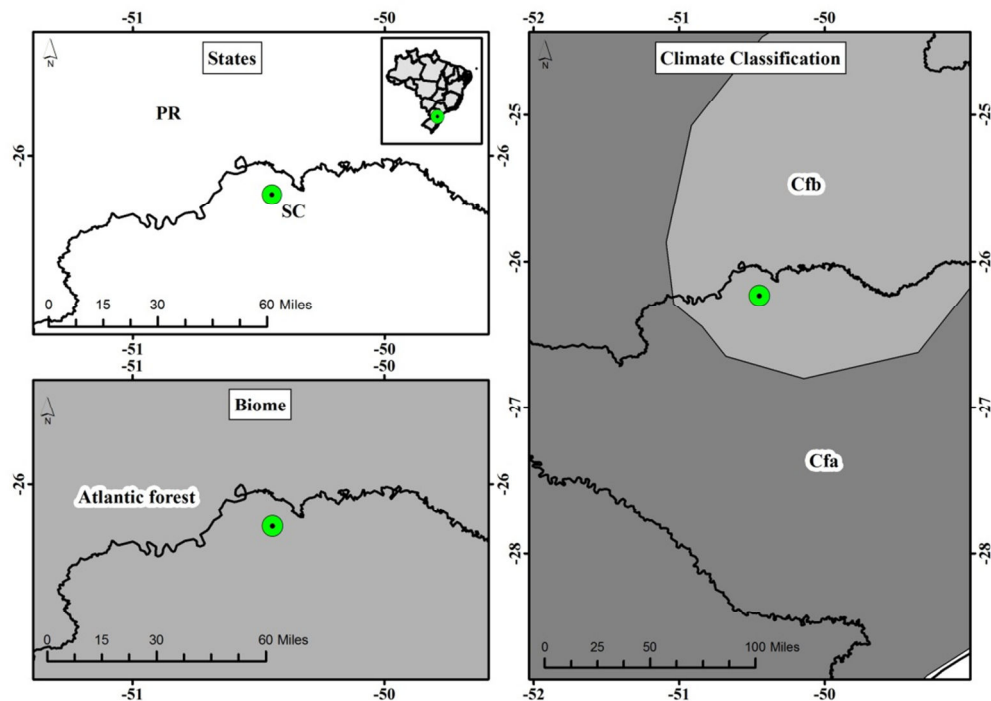


FIGURA 1.7 – LOCALIZAÇÃO, CLIMA E VEGETAÇÃO DO POVOAMENTO DE *Eucalyptus dunnii* MAIDEN EM TRÊS BARRAS, SC.
FONTE: O autor (2015).

3.2.2 Modelos para estimar a altura e o volume

Utilizando dados de diâmetro e altura total das *UA* do inventário florestal e cubagem previamente realizados, foram estimadas as alturas totais em metros das árvores não mensuradas em campo, por meio da aplicação do modelo genérico de Scolforo (1997b) e o volume médio por árvore em m³, com a aplicação do modelo de Schumacher e Hall modificado pelo conceito de variáveis *Dummy*, conforme definido em Scolforo (1997) e Figueiredo (2005). O Coeficiente de Determinação Ajustado ($R^2_{ajust.}$) e erro padrão da estimativa ($S_{yx}\%$) foram usados para validação estatística dos modelos (TABELA 1.3).

Os valores do $R^2_{ajust.}$ (0,90) e $S_{yx}\%$ (10,0) obtido para o modelo hipsométrico genérico é semelhante aos encontrados por Abreu *et al.* (2002) e Ribeiro *et al.* (2010). Da mesma forma, resultados apropriados também foram encontrados para o modelo volumétrico de Schumacher e Hall com variáveis fictícias, com $R^2_{ajust.}$ (0,99) e $S_{yx}\%$ (9,65), próximos aos encontrado por Schneider e Tonini (2003) e Martins *et al.* (2015).

Muito embora o modelo volumétrico permita extrair os volumes com casca e sem casca, no presente estudo serão apenas abordadas estimativas volumétricas do volume com casca.

Depois de obtido o volume médio em m³ das árvores pela equação ajustada de Schumacher e Hall, foi obtida a estimativa de volume por hectare e para a área total do talhão, multiplicando-a pelo número total de árvores encontradas em cada método: censo, área fixa e área variável.

TABELA 1.3 – MODELAGEM PARA A ALTURA TOTAL E VOLUME INDIVIDUAL DE POVOAMENTO DE *Eucalyptus dunnii* Maiden EM TRÊS BARRAS, SC.

Descrição	$R^2_{ajust.}$	$S_{yx}\%$
Modelo genérico de Scolforo $\ln(h) = \beta_0 + \beta_1 \ln(h_{dom}) + \beta_2 \ln\left(\frac{D_g}{dap}\right) + \beta_3 \left(\frac{1}{dap}\right)^{-1} + \beta_4 \ln\left(\frac{1}{dap}\right) + \epsilon$	-	-
Equação ajustada $\ln(h) = -0,0890 + 0,2060 \ln(h_{dom}) + -0,0188 \ln\left(\frac{D_g}{dap}\right) + -0,1782 \left(\frac{1}{dap}\right)^{-1} + -1,0612 \ln\left(\frac{1}{dap}\right)$	0,90	10,0
Modelo de Schumacher e Hall com variáveis dummy $(\ln(vtcc)D1 + \ln(vtsc)D2) = \beta_0 D1 + \beta_1 D2 + \beta_2 \ln(dap)D1 + \beta_3 \ln(dap)D2 + \beta_4 \ln(h)D1 + \beta_5 \ln(h)D2 + \epsilon_i$	-	-

continua

conclusão		
Equação ajustada $(\ln(vtcc)D1 + \ln(vtsc)D2) = -9,7268D1 + -11,0327D2 + 2,0276 \ln(dap)D1 + 2,0007 \ln(dap)D2 + 0,8018 \ln(h)D1 + 1,1453 \ln(h)D2$	0,99	9,65

Em que: h e h_{dom} : altura total e dominante, em m, respectivamente; vtcc e vtsc: volume total com e sem casca, em m³; dap: diâmetro a 1,3m do solo, em cm; D_g : diâmetro quadrático médio, em cm; l: idade, em anos; β_i : parâmetros do modelo; ln: logaritmo neperiano; D1 e D2: variáveis dummy (0 e 1) e ε : erro aleatório.

FONTE: O AUTOR (2015).

Para testar a existência de diferenças significativas entre o volume total obtido pela metodologia do censo, PPA e PPAV, foi empregada a análise da variância (ANOVA), aos níveis de 95% e 99% de probabilidade.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAF. **Anuário estatístico da ABRAF 2013**: ano base 2012/ ABRAF. – Brasília, 148p., 2013.

AMARO, A., REED, D., TOMÉ, M., THEMIDO, I. Modeling dominant height growth: Eucalyptus plantations in Portugal. **Forest Science** v. 44 (1) p. 37-46., 1998.

ANDRADE, L. O. **Biometria Florestal Aplicada**. Ed. pelo autor. Três Barras, SC, 189 p., 2004.

ASSMANN, E. The Principles of Forest Yield Study. **Pergamon Press Ltd**. Oxford, England. 506 p., 1970.

BERTALANFFY, L. V. Problems of organic growth. **Nature**, London, v. 163, p. 156-158, 1949.

BICKFORD, C. A. **On Successive Forest Inventories**. Division of Forest Management Proceedings, p. 25-30., 1963.

BITTERLICH, W. Die Winkelzählprobe. **Allg. Forst-u. Holzwirtschaft. Ztg.**, 59 (1/2): 4-5, 1948.

BOGNOLA I. A., LINGNAU, C., LAVORANTI, O. J., HIGA, A. R., STOLLE, L., OLIVEIRA, E. B., FRANCISCON, L. **Modelagem da variabilidade espacial do rendimento produtivo de *Pinus taeda* L. com uso da geoestatística**. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, INPE p. 3591-3596. 2009.

BURKHART, H.E. & TENNENT, R.B. Site index equations for radiata pine in New Zealand. **New Zealand Journal of Forestry Science** 7 p.408–416, 1977.

BURKHART. H. E, TOMÉ, M. Modeling Forest Trees and Stands, **Springer, Dordrecht**, 457 p., 2012.

CAMPOS, J. C. C., LEITE, H. G. **Mensuração florestal: Perguntas e respostas**. 2ª edição, Viçosa, Editora UFV, 470p, 2006.

CASTILLO LÓPEZ, VARGAS-LARRETA, A. B., RIVAS, J. J. C., LUNA, J. A. N., COBOS, F. C., HERNÁNDEZ, F. J. Modelo compatible altura-índice de sitio para cuatro especies de pino em Santiago Papasquiaro, Durango. **Rev. Mex. Cien. For.** v. 4, n. 18, p. 86-103, 2013.

CIESZEWSKI, C. J., STRUB. M. Generalized algebraic difference approach derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes from exponential and logarithmic functions. **Forest Science** v. 54, p.303-315. 2008.

CIESZEWSKI, C.; BAILEY, R. L. Generalized Algebraic Difference Approach: Theory based derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes. **Forest Science**. v.46, p. 116-126, 2000.

CLUTTER, J. L., FORTSON J.C., PIENAAR, L. V., BRISTER, G. H., BAILEY, R. L. **Timber management: a quantitative approach**. New York: Wiley & Sons, 333 p., 1983.

COTTAM, G. & CURTIS, J. T. The use of Distance Measures in Phytosociological Sampling. **Ecology**, v.37, n.3. 1956, p. 451-460, 1956.

CURTIS, R.O. A stern-analysis approach to site-index curves. **Forest Science**, v. 10(2) p. 241-256, 1964.

DE LOS SANTOS-POSADAS H. M., M. MONTERO-MATA, Y M. MARKKU.. Curvas dinámicas de crecimiento en altura dominante para *Terminalia amazonia* (Gmel.) Excell en Costa Rica. **Agrociencia** 40: 521-532., 2006.

DIÉGUEZ-ARANDA, U., GRANDAS-ARIAS, J.A., ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G. & GADOW, K.V. **Site quality curves for birch stands in north-western Spain**. Silva Fennica v. 40(4). p. 631–644, 2006.

EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 2006. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**, 2.ed. Rio de Janeiro.

FIGUEIREDO, O. F. **Método da Variável Fictícia para Ajuste de Modelos Volumétricos Estáveis e Compatíveis em Povoamentos Florestais**, Rio Branco, Embrapa Acre. Documentos 95. 28 p., 2005.

HUSCH, B.; BEERS, T. W.; KERSHAW JR., J. A. **Forest mensuration**. 4ª edição, Hoboken, New Jersey, J. Wiley & Sons, 447 p., 1923.

IGNÁCIO, S. A. **Precisão e eficiência de processos de subamostragem com unidades primárias de tamanhos desiguais em inventários de plantações de *Eucalyptus spp.*** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná. 143 p., 2001.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório IBÁ 2015**, disponível em: http://iba.org/images/shared/iba_2015.pdf. Acesso em 03/11/2015.

KANGAS, A. MALTAMO, M. **Forest inventory methodology and applications**. Springer, Dordrecht, 362 p., 2006.

KING, J. E. **Site index curves for Douglas-fir in the Pacific Northwest**. Weyerhaeuser For. Paper 8. Centralia, WA. 49 p., 1966.

KRUMLAND B, H, ENG. Site Index Systems for Major Young-Growth Forest and Woodland Species in Northern California. The Resources Agency. Calif. Dept. of Forestry and Fire Protection. **California Forestry Report N° 4**. State of California. 220 p., 2005.

MACEDO, J. H. P.; MACHADO, S. A. **A engenharia Florestal da UFPR: história e evolução da primeira do Brasil**, Curitiba, Editado pelos autores, 513 p., 2003.

MAESTRI, R. **Modelo de crescimento e produção para povoamentos clonais de *Eucalyptus grandis* considerando variáveis ambientais**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná. 143 p., 2003.

MANDALLAZ, D. **Sampling Techniques for Forest Inventories**. Chapman & Hall CRC. Taylor & Francis. 256 p., 2008.

MARINHESKI FILHO, A. DIAS, H. I. DAVID, H. C. **Relatório de inventário florestal da Celulose Irani para povoamentos de *Pinus spp***, 123 p. 2015.

MELLO, J. M.; OLIVEIRA, M. S., BATISTA, J. L. F., RIBEIRO JÚNIOR, P. J., KANEGAE JUNIOR, H. Uso do estimador geoestatístico para predição volumétrica por talhão. **Floresta**, Curitiba, v. 36, n. 2, p. 251- 260, 2006.

NIGH, G. Engelmann Spruce Site Index Models: A Comparison of Model Functions and Parameterizations. **PLOS ONE**, p. 1-19, 2015.

PÉLLICO NETTO, S.; BRENA, D. A. **Inventário Florestal**. Ed. pelos autores. Curitiba, 316 p., 1997.

PÉLLICO NETTO, S. Die Forstinventuren in Brasilien, Neue Entwicklungen und ihr Beitrag für eine geregelte Forstwirtschaft, Freiburg. 234p, 1979.

PÉLLICO NETTO, S.; STEFANELLO, F. R.; PELLISSARI, A. L.; DAVID, H. C. Mapping of sites in Forest stands. **An. Acad. Bras. Cienc.**, Rio de Janeiro, v. 86, n. 4, 2025-2037, 2014.

PELLISSARI, A. L. **Geoestatística aplicada ao manejo de povoamentos de *Tectona grandis* L. f.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná. 119 p., 2015.

PRODAN, M. Holzmesslehre. Frankfurt, J. D. **Sauerländer's Verlag**, 644 p., 1965.

SANQUETTA, C. R., DALLA CORTE, A. P., RODRIGUES, A. L., WATZLAWICK, L. F. **Inventários Florestais: Planejamento e Execução**. 3ª edição, Revisada e Ampliada. Editor: Carlos Roberto Sanquetta. Multi-Graphic, Gráfica e Editora. Curitiba, 406 p., 2014.

SCHMID, P. **Swiss Continuous Forest Inventory**, Swiss Forest Research Institute, Birmensdorf, Zurich. 1971.

SCHNEIDER, P. R., TONINI, H. Utilização de variáveis dummy em equações de volume para *Acacia mearnsii* de Wild. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 13, n. 2, p. 121-129., 2003.

SCOLFORO, J. S. R. **Mensuração florestal: Avaliação de produtividade florestal através da classificação do sítio**. ESAL/FAEPE, Lavras, p. 451, 1993.

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal 2: técnicas de regressão aplicada para estimar: volume, biomassa, relação hipsométrica e múltiplos produtos da madeira.** Lavras: UFLA/FAEPE. 292p. (Curso de Pós-Graduação “Lato Sensu” (Especialização) a Distância: Manejo de Florestas Plantadas e Florestas Nativas), 1997.

SCOLFORO, J. S. R. **Modelagem do crescimento e da produção de florestas plantadas e nativas.** UFLA/FAEPE, Lavras, p. 451, 1998.

SENYURT, M., ERCANLI, I. Dynamic Base-age Invariant Site Index Models for Scotch Pine (*Pinus silvestris* L.) in Kastamonu Forest Regional Directorate. **International Caucasian Forestry Symposium.** p. 179-183., 2013.

SERVIÇO FLORESTAL BRASILEIRO. Sistema de Amostragem do Inventário Florestal Nacional. Disponível em: http://ifn.florestal.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=113&Itemid=116. Acesso em 08/12/2015.

SKOVSGAARD, j. p. VANCLAY, j. k. Forest site productivity, A review od the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. **Forestry** v. 81, p. 13-31, 2008.

SOARES, A. **Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente.** 2 ed. Lisboa, IST Press, 2006.

STRAND, L. Sampling for volume along a line. **Meddelelser fra Det norske Skogforsoksvesen**, (51): 327-331, 1958.

WEISKITTEL, A. R., HANN, D. W., KERSHAW JR., J. A., VANCLAY, J. K. **Forest Growth and Yield Modeling.** John Wiley & Sons, 344 p, 2011.

YAMAMOTO, J. K.; LANDIM, P. M. B. **Geoestatística: conceitos e aplicações.** São Paulo: Oficina de textos, 2013. 215 p.

CAPÍTULO I

CLASSIFICAÇÃO DE SÍTIO PARA *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL

RESUMO

No Brasil, o cultivo de eucaliptos está em pleno processo de expansão, incluindo locais com características edafoclimáticas ainda pouco conhecidas, seja sob o ponto de vista da silvicultura, do material genético ou manejo. Dessa forma, o objetivo do presente trabalho foi determinar a capacidade produtiva do sítio florestal aplicando diversos métodos de ajuste, aliado ao emprego da geoestatística em povoamentos de *Eucalyptus* sp. em região de clima tropical do Brasil. Dados de 4 anos de um inventário florestal contínuo foram coletados em 845 unidades amostrais de área variável alocadas sistematicamente na intensidade de 1 unidade amostral a cada 2,5 hectares, em 2.110,66 hectares de plantios de *Eucalyptus* sp., distribuídos em áreas do bioma cerrado, no estado do Maranhão, Brasil. Para a classificação da capacidade produtiva local, curvas de sítio foram testadas pelos métodos da curva-guia (GC), diferenças algébricas (ADA) e diferenças algébricas generalizadas (GADA), a partir do ajuste de modelos com características biológicas de Bailey 4P e de Chapman-Richards, considerando a idade de referência de sete anos. Os modelos foram testados estatisticamente pelo Coeficiente de Determinação Ajustado ($R^2_{\text{ajust.}}$), Erro Padrão da Estimativa ($S_{yx}\%$) e Dispersão gráfica de Resíduos ($E\%$). Adicionalmente, o modelo que melhor representou os dados do povoamento foi utilizado para estimar as alturas dominantes de cada Unidade Amostrai (UA) na idade de referência, sendo que essa informação foi utilizada para aplicação da krigagem ordinária, por meio dos modelos esférico, exponencial e gaussiano, com intuito de determinar a dependência espacial da variável sítio e delimitar geograficamente as classes de sítio e suas respectivas áreas em hectare para cada Unidade Anual de Produção (UAP). Os modelos testados foram avaliados pelas estatísticas do semivariograma teórico e validação cruzada. Como resultado, o modelo de Chapman-Richards ajustado pelo método GADA propiciou os melhores resultados estatísticos ($R^2_{\text{ajust.}}$: 0,899 e S_{yx} : 4,92%) e sem tendência na distribuição residual, sendo selecionado para estimar as alturas dominantes na idade de referências de 7 anos com ganhos de precisão de 12,23% superior à metodologia ADA e 39,80% superior em relação a GC. O modelo exponencial foi selecionado para representar a distribuição espacial da variável altura dominante na idade de referência de 7 anos, quando foi observado grau elevado de dependência espacial (GD: 76,9%), coeficiente de determinação ($R^2=0,94$), ao passo que a validação cruzada apresentou erro padrão da estimativa ($S_{yx}=5,25\%$) e ($R^2= 0,64$), demonstrando a eficácia da modelagem para representar a distribuição espacial dessa variável.

Palavras-chave: Diferenças algébricas generalizadas, geoestatística, curva guia.

CHAPTER I

SITE CLASSIFICATION TO *Eucalyptus* sp IN TROPICAL REGION OF BRAZIL

ABSTRACT

In Brazil *Eucalyptus* cultivation is in expansion, including local soil and climatic characteristics still not well known, on the aspects of silviculture, genetic material or management. Thus, the objective this study was to determine the productive capacity of forest site by applying various methods of adjustment, combined with the use of geostatistic to stands of *Eucalyptus* sp. in tropical region of Brazil. Data from a continuous forest inventory were collected in a four years period in 845 plots of variable area, in a systematic grid distribution, allocated in the intensity of one plot every 2.5 hectares in 2,110.66 hectares of *Eucalyptus* sp. plantations, distributed in Brazilian Savannah biome, in Maranhão State, Brazil. For the classification of local production capacity, site curves were tested by methods of guide curve (GC), algebraic difference approach (ADA) and generalized algebraic difference approach (GADA), using models with biological characteristics from Bailey 4P and Chapman-Richards, considering the age of reference equal to seven years. The models were tested statistically by the adjusted coefficient of determination (R^2_{ajust}) standard error of the estimate in percentage ($S_{yx}\%$) and graphical analysis of residuals ($E\%$). Additionally, the model that best represented the population data was used to estimate the dominant heights of each plot at the reference age, and this information was used for application of ordinary kriging, through the spherical, exponential and Gaussian models, aiming to determine the spatial dependence of the variable site, geographical boundary site classes and their respective areas for each hectare in an Annual Production Unit (APU). The tested models were evaluated by the statistics of the theoretical semivariogram and cross-validation. As a result, the Chapman-Richards model was adjusted by GADA method which led to the best statistical results ($R^2_{\text{ajust}} = 0.899$ and $S_{yx} = 4.92\%$) and no residual tendency in the selected distribution to estimate the dominant heights at the reference age of 7 years with gains of 12.23% on the ADA methodology and 39.80% on GC. The exponential model was selected to represent the spatial distribution of dominant height at the reference age of 7 years, when it was observed high degree of spatial dependence ($GD = 76.9\%$), coefficient of determination ($R^2 = 0.94$), while for the cross-validation resulted ($S_{yx}\% = 5.25\%$) and ($R^2 = 0.64$), demonstrating the effectiveness of the modeling to represent the spatial distribution of that variable.

Keywords: generalized algebraic approach, geostatistic, guide curve.

1. INTRODUÇÃO

O estudo de crescimento e produção das florestas plantadas é imprescindível, dado as necessidades de cunho estratégico gerencial, das melhorias de práticas silviculturais, melhoramento genético e maximização dos ganhos em produção.

A capacidade de uma dada espécie ou material genético crescer em um dado local engloba fatores ecológicos: climático, edáfico e biológico (SCOLFORD, 2008).

Segundo Burkhart e Tomé (2012) a análise do índice de sítio, que é a altura média das árvores dominantes a uma determinada idade de referência (CLUTTER *et al.*, 1983) está fortemente correlacionada aos fatores de crescimento e com o volume da produção, não é fortemente influenciada pela densidade e por tratamentos de desbastes e reflete uma fonte confiável de informação.

Para Andrade (2004), as curvas de índice de sítio constituem-se atualmente no método mais prático e difundido para classificar a produtividade florestal, uma vez que utiliza a variável altura dominante, que é a resposta aos fatores ambientais inter-relacionados, sendo altamente correlacionada com a produção volumétrica. Além disso, as alturas dominantes são relativamente independentes da densidade do povoamento.

De acordo com Cieszewski e Strub (2008), a modelagem de predição da altura dominante tem evoluído constantemente desde o surgimento dos modelos de Schumacher (1935; 1939), citando os autores: Coile e Schumacher (1964), Bailey e Clutter (1974), Curtis *et al.* (1974), Bailey (1980), Newnham (1988), Huang (1994), Amaro *et al.* (1998), Cieszewski e Bailey (2000) e Krumland e Eng (2005).

Os métodos de construção das curvas de produção por meio de alturas dominantes, com dados provenientes de unidades amostrais temporárias, permanentes e análise de troco (ANATRO), mais difundidos são:

- 1) Curva guia (*guide curve - GC*);
- 2) Diferenças Algébricas (*Algebraic Difference Approach - ADA*);
- 3) Predição dos Parâmetros (*Parameter Prediction – PP*); e
- 4) Diferenças Algébricas Generalizadas (*Generalized Algebraic Difference Approach – GADA*).

Para determinar qual método será utilizado, alguns conceitos e características desejáveis devem ser considerados na construção das curvas de sítio (BAILEY; CLUTTER, 1974; CIESZEWSKI; BAILEY, 2000; CASTILLO LÓPEZ *et al.*, 2013): Padrão sigmoide de crescimento com um ponto de inflexão, a capacidade de chegar a uma assíntota horizontal em idades mais avançadas, ter uma resposta lógica (por exemplo, altura dominante deve ser zero na idade zero e a curva deve sempre ser crescente), ser invariante em relação ao caminho de simulação (*path invariance*) e no que diz respeito à idade de referência (*base-age invariance*). A condição de invariância no que diz respeito à maneira de simulação implica que, quando parte-se da altura dominante H_1 na idade t_1 e é estimado com as curvas o valor da altura dominante H_3 na idade t_3 , deve-se obter o mesmo valor ao se estimar primeiro a altura dominante H_2 na idade t_2 e então com esse valor estimar a altura dominante no instante da idade t_3 .

A condição de invariância no que diz respeito à idade de referência implica que a forma das curvas não deve variar qualquer que seja a idade de referência que é usada para definir o índice de sítio. No entanto, idade de referência a ser usada deve ser próxima da idade de rotação esperada, por ter a altura, nessa idade, uma maior correlação com a produção volumétrica (PECE DE RIOS, 1993).

Basicamente, dois tipos de curvas de índice de sítio podem ser construídos: curvas harmônicas ou anamórficas e curvas naturais ou polimórficas. As curvas anamórficas são construídas ajustando-se uma curva guia em função da idade. Posteriormente, uma série de curvas com mesma forma, acima e abaixo da curva guia é construída, diferindo apenas em magnitude, por uma porcentagem fixa.

As curvas anamórficas apresentam basicamente duas fontes de erros (BATISTA; COUTO, 1986; ANDRADE, 2004):

- 1) As curvas anamórficas só são precisas quando a amostragem é adequadamente realizada, de forma que a variação do índice de sítio seja igualmente representada em todas as idades;
- 2) As curvas anamórficas consideram que a influência da variação do sítio sobre o crescimento em altura dominante seja uniforme em todas as idades, de modo que a forma das curvas de crescimento em altura é a mesma para todos os sítios.

As curvas polimórficas são construídas através do emprego de dados

provenientes de parcelas permanentes ou de análise de tronco. Elas pressupõem que a forma das curvas de crescimento das árvores varia de sítio para sítio, ou seja, não apresentam proporcionalidade no crescimento da altura das árvores dominantes, entre classes de sítio diferentes. Na atualidade, parece haver consenso entre a maioria dos pesquisadores (SCOLFORO, 1993; CIEZEWSKI; BAILEY, 2000; WEISKITTEL *et al.*, 2011; BURKHART; TOMÉ, 2012), de que as curvas polimórficas são superiores às curvas anamórficas, em relação à precisão da estimativa do índice de sítio.

O método da curva guia permite apenas a construção de curvas anamórficas, sendo, portanto, o método mais simples e menos indicado entre os demais.

Os métodos das diferenças algébricas e de predição dos parâmetros, no entanto, têm se apresentado como uma alternativa eficaz na construção das curvas de sítio polimórficas, atendendo as premissas de diferentes taxas de crescimento entre sítios distintos e invariantes em relação ao caminho da simulação e idade de referência. Bailey e Clutter (1974) formalizaram a propriedade de invariância em relação aos modelos de idade em índice do sítio e apresentaram uma técnica para derivar equações por método dinâmico conhecido como diferenças algébricas (*Algebraic Difference Approach - ADA*), que envolve essencialmente a substituição de um parâmetro do modelo base e expressá-lo como dispensável função do sítio (neste caso, uma combinação de altura dominante e idade). A principal limitação da metodologia ADA é que a maioria dos modelos derivados é anamórfico ou têm uma assíntota comum (BAILEY; CLUTTER, 1974; CIESZEWSKI; BAILEY, 2000).

Cieszewski e Bailey (2000) introduziram uma generalização da metodologia ADA, o método das diferenças algébricas generalizadas (*Generalized Algebraic Difference Approach – GADA*). A principal vantagem desse método é que a equação de base pode ser expandida de acordo com várias teorias de crescimento, como a taxa de crescimento e assíntota, permitindo que mais de um parâmetro de cada modelo dependa da qualidade do local, e que as famílias de curvas obtidas sejam mais flexíveis (CIESZEWSKI; BAILEY, 2000; CIESZEWSKI, 2001, 2002, 2003). Com essa generalização pode se obter famílias de curvas que sejam polimórficas e com múltiplas assíntotas (CIESZEWSKI, 2002).

A classificação de sítio tradicional, indiferente do método, conforme aqui

exposto, leva em consideração a média específica de um ponto amostral avaliado, não levando em consideração possíveis correlações entre unidades amostradas na região de sua vizinhança (BOGNOLA *et al.*, 2009; MELLO, 2004).

Nesse contexto o uso das técnicas de geoestatística ganha expressivo espaço funcional, visto que possíveis dependências espaciais existentes entre unidades amostradas possam ser explicadas de forma integrada. Ainda, como maior vantagem, locais não amostrados podem receber sem tendenciosidade atribuição quantitativa ou qualitativa, de forma correlacionada e interpolada aos pontos amostrados, por meio do emprego de técnicas de regressão linear múltipla.

Essa ferramenta traz vantagens à modelagem do sítio e a processos de amostragem sobre distintas formas, permitindo a definição de espacialização geográfica de variáveis de interesse, quantificação de áreas, estratificação mais aprimorada da população, melhoria dos estimadores estatísticos e redução de erros amostrais, gerando ainda ferramentas para demarcação física das unidades de produção e do manejo silvicultural direcionado ou de precisão.

No Brasil, a proximidade do esgotamento das áreas disponíveis ao cultivo de maciços florestais em locais tradicionalmente produtores desencadeou o processo de expansão da fronteira de produção para locais com características edafoclimáticas distintas, onde a modelagem do crescimento e da produção é ainda pouco conhecida.

Aliado a esses fatores, o conceito de manejo de precisão utilizando métodos geoestatísticos permite uma gestão mais eficaz e precisa dos povoamentos florestais, reduzindo, inclusive, os custos de produção.

Ainda, sendo o sítio uma importante e indispensável variável utilizada na melhoria dos estimadores estatísticos amostrais, quando essa é associada como fator de estratificação da população (PÉLLICO NETTO *et al.*, 2014), o propósito da presente pesquisa é gerar classes de produtividade local, mediante três métodos (GC; ADA; GADA) de construção das curvas de sítio para *Eucalyptus* sp. em região tropical do Brasil, por meio de dados de unidades amostrais permanentes mensuradas anualmente entre 2011 e 2014 e posteriormente a essa construção empregar a geoestatística para classificar a base cartográfica dos plantios.

1.1 OBJETIVO GERAL

Classificar a capacidade produtiva de sítios florestais com base em índice de local por meio de métodos tradicionais e geoestatística para povoamentos clonais de *Eucalyptus* sp. em região tropical do Brasil.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Ajustar modelos para a classificação de sítios florestais, empregando os métodos: da curva guia, da diferenças algébricas e das diferenças algébricas generalizadas;
- Empregar a krigagem ordinária às alturas dominantes para testar a dependência espacial da variável e em caso afirmativo delimitar os limites espaciais das classes de sítio na base cartográfica dos povoamentos, de acordo com seus índices de sítio na idade de referência.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Para efetuar a presente pesquisa, foram utilizados 2.452 pares de dados altura dominante (h_{dom}) e idade, oriundos de 845 unidades amostrais permanentes, distribuídas sistematicamente numa intensidade amostral de 1:2,5 hectares, em povoamentos de *Eucalyptus* sp. em uma região tropical do Brasil, conforme apresentado na caracterização da área de estudo.

O princípio de Assmann (1970) foi empregado para determinar as alturas dominantes de cada unidade amostral, baseado na média das alturas dominantes das 100 árvores com maior diâmetro, sadias e livres de defeito por hectare.

A classificação da capacidade produtiva foi testada utilizando-se 3 métodos de ajuste do índice de sítio, sendo: Curva guia (GC), Diferenças Algébricas (ADA) e Diferenças Algébricas Generalizadas (GADA).

Os dados (FIGURA 2.1) apresentam uma amplitude de idade de 26 a 93 meses e 11,50 a 32,8 metros de altura, distribuídos proporcionalmente entre três unidades anuais de produção (UAP), plantadas em 2007, 2008, 2009, respectivamente. A UAP 2007 possui área total de 1.085 hectares, enquanto a UAP 2008 de 840 hectares e a UAP 2009 de 187,5 hectares.

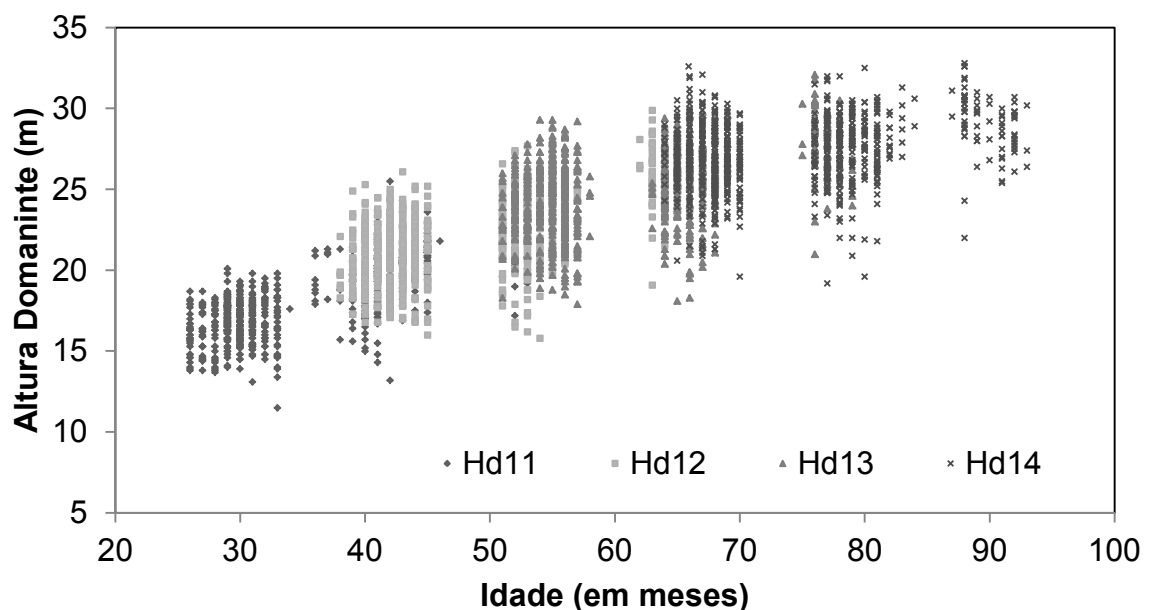


FIGURA 2.1 – DISTRIBUIÇÃO RESIDUAL DO MODELO HIPNOMÉTRICO (A) E DO VOLUME (B).
FONTE: O autor (2015).

Os valores mínimo, máximo e médio, assim como os coeficientes de variação (CV) do diâmetro ($d_{1,30m}$), da altura total e idade dos dados estão apresentados na (TABELA 2.1).

TABELA 2.1 – CARACTERIZAÇÃO DAS VARIÁVEIS UTILIZADAS PARA O AJUSTE DOS MODELOS DE ÍNDICE DE SÍTIO PARA *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.

Estatística	$d_{1,30m}$	Altura (m)	Idade (meses)
Mínimo	8,6	11,5	26
Máximo	22,8	32,8	93
Média	14,2	23,3	54,8
CV (%)	15,7	17,4	28,8

FONTE: O autor (2015).

A coleta dos dados foi feita em unidades amostrais permanentes, de forma retangular, com área variável (PPAV), alocadas pelo processo de amostragem sistemático com grid quadrado de 158,1m de distância.

Foram ajustados quatro modelos não lineares (TABELA 2.2), amplamente difundidos no meio florestal, dado sua flexibilidade, seguir um padrão sigmoide, ter um ponto de inflexão e uma assíntota horizontal. Os modelos 1 e 2 foram ajustados pelo método da curva guia, os modelos 3 e 4 pelo método das diferenças algébricas. O modelo (5) foi ajustado com aplicação da metodologia das diferenças algébricas generalizadas proposta por Cieszewski e Bailey (2000) para obtenção das curvas de sítio (TABELA 2.3).

Os coeficientes de regressão dos modelos, ajustados pelo método da curva guia (GC) e diferenças algébricas (ADA), foram estimados pelo método de Levenberg–Marquardt para a minimização da soma de quadrados residuais não lineares (MARQUARDT, 1963), com o auxílio do *software* Statgraphics Centurion XVI, versão 16.1.02.

O método de ajuste dos parâmetros globais e locais da metodologia GADA foi efetuado por procedimento específico “*nested iterative procedure*” (CIESZEWSKI; BAILEY, 2000; CIESZEWSKI, 2001, 2002, 2003) com auxílio do *software* R.

TABELA 2.2 – MODELOS NÃO-LINEARES AJUSTADOS PARA CLASSIFICAÇÃO DE SÍTIOS FLORESTAIS DE *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL COM O MÉTODO DA CURVA GUIA E DIFERENÇAS ALGÉBRICAS.

Autor	Equação base	Modelo-Guia	Nº
Chapman-Richards	$H_1 = \theta_1 \cdot (1 - e^{-\theta_2 \cdot t_0})^{\theta_3} + \varepsilon$	$H_1 = S \cdot \left[\frac{1 - e^{(-\theta_2 \cdot t_0)}}{1 - e^{(-\theta_2 \cdot t_1)}} \right]^{\theta_3} + \varepsilon$	(1)
Bailey de 4 parâmetros	$H_1 = \theta_1 \cdot (1 - e^{-\theta_2 \cdot t_0^{\theta_3}})^{\theta_4} + \varepsilon$	$H_1 = S \cdot \left(\frac{1 - e^{-\theta_2 \cdot t_0^{\theta_3}}}{1 - e^{-\theta_2 \cdot t_1^{\theta_3}}} \right)^{\theta_4} + \varepsilon$	(2)
Chapman-Richards Modificado Clutter (1998)	$H_1 = H_0 \cdot \left[\frac{1 - e^{(-\theta_1 \cdot t_1)}}{1 - e^{(-\theta_1 \cdot t_0)}} \right]^{\theta_2} + \varepsilon$	$H_1 = S \cdot \left[\frac{1 - e^{(-\theta_1 \cdot t_1)}}{1 - e^{(-\theta_1 \cdot t_0)}} \right]^{\theta_2} + \varepsilon$	(3)
Chapman-Richards Modificado Por Amaro <i>et. al.</i> (1998)	$H_1 = \theta_1 \cdot \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{H_0}{\theta_1} \right)^{\frac{1}{\theta_2}} \right]^{\frac{t_1}{t_0}} \right\}^{\theta_2} + \varepsilon$	$H_1 = \theta_1 \cdot \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{S}{\theta_1} \right)^{\frac{1}{\theta_2}} \right]^{\frac{t_0}{t_1}} \right\}^{\theta_2} + \varepsilon$	(4)

Em que: H_1 : altura dominante da i-ésima árvore na idade t , em m; t : idade no tempo 1, em anos; t_0 idade no tempo 0, em anos; S: índice de sítio, em m; $\theta_1, \theta_2 \dots \theta_n$ parâmetros do modelo; e : exponencial de Euler; ε : erro aleatório.

FONTE: O autor (2015).

TABELA 2.3 – MODELO NÃO-LINEAR AJUSTADO PARA CLASSIFICAÇÃO DE SÍTIOS FLORESTAIS DE *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL COM O MÉTODO DAS DIFERENÇAS ALGÉBRICAS GENERALIZADAS.

Equação base	Parâmetros relativos ao sítio	Solução para X com valores iniciais (t_0, Y_0)	Equação dinâmica	Nº
Chapman-Richards $H = a_1 \cdot (1 - e^{-a_2 \cdot t})^{a_3} + \varepsilon$	$a_1 = e^{(X)}$ $a_2 = b_2 + b_3 / X$	$X_0 = \frac{1}{2} \left[(\ln H_0 - b_2 L_0) + \sqrt{(\ln H_0 - b_2 L_0)^2 - 4 b_3 L_0} \right]$ $L_0 = \ln[1 - e^{-b_1 t_0}]$	$H_1 = H_0 \left[\frac{1 - e^{(-b_1 t_1)}}{1 - e^{(-b_1 t_0)}} \right]^{b_2 + b_3 / X_0} + \varepsilon$	(5)

Em que: todas as expressões estão apresentadas no item 2.1 Formulação da metodologia GADA.

FONTE: O autor (2015).

2.1 FORMULAÇÃO DA METODOLOGIA GADA

Para apresentar a metodologia GADA, foi elaborada uma ampla pesquisa na literatura internacional, dado a metodologia ainda não ter sido difundida no Brasil. As concepções e formulações matemáticas foram adaptadas de Cieszewski e Bailey, (2000); Cieszewski (2001, 2002, 2003) por Vargas-Larreta et al (2010) no estudo “*Construcción de Curvas Dinámicas de Índice de Sitio para Pinus cooperi Blanco*”.

O primeiro passo para ajustar um modelo com a formulação GADA é selecionar uma equação base e identificar o número de parâmetros dessa equação, que serão dependentes da produtividade do sítio. Posteriormente, esses parâmetros devem ser expressos como funções do local por uma variável X (variáveis observáveis e independentes que descrevem a produtividade do sítio como resultado da soma dos fatores, como regimes de manejo, condições do solo, fatores ecológicos e climáticos) e novos parâmetros. Dessa forma, a equação bidimensional inicialmente selecionada $[(H = f(t))]$ é expandida em uma equação explícita tridimensional de índice de sítio $[(H = f(t, X))]$.

Dado que a variável X não pode ser medida na realidade ou definida funcionalmente, o passo final do procedimento GADA implica em tornar o valor de X a partir de condições iniciais do local, ou seja, valores de partida de idade e altura dominante, t_0 e H_0 ($H_0 = f(t, t_0, H_0)$), de forma que o modelo possa ser definido implicitamente e aplicado na prática (CIESZEWSKI; BAILEY, 2000; CIESZEWSKI, 2002).

Neste trabalho, se utilizou o modelo de Chapman-Richards (CHAPMAN, 1961; RICHARDS, 1959), o qual é flexível, e amplamente utilizado na construção de curvas de índice de sítio. Esse modelo tem uma assíntota horizontal, segue um padrão de crescimento sigmoide, e tem um ponto de inflexão. A equação base é representada por:

$$H = a_1 \cdot (1 - e^{-a_2 \cdot t_0})^{a_3} \quad (5)$$

Em que:

H = altura dominante (m);

t_0 = idade atual (meses);

a_1, a_2 e a_3 = parâmetros quem representa a assíntota horizontal, ponto de inflexão e

taxa de crescimento respectivamente.

Com a notação geral da formulação GADA, $a_1, a_2 \dots a_n$ se referem aos parâmetros do modelo base, isto é, parâmetros locais que trocam de um sítio para outro, enquanto que $b_1, b_2 \dots b_n$ são os parâmetros globais que permanecem constantes para todos os sítios. Todas as formulações GADA apresentam a forma geral:

$$Y = f(t, t_0, Y_0, b_1, b_2 \dots b_m)$$

Em que:

Y = é o valor da função na idade t ;

Y_0 = é a variável de referência definida como o valor da função na idade t_0 .

Para derivar um modelo polimórfico com múltiplas assíntotas a partir do modelo de Chapman-Richards anteriormente definido (5), mais de um parâmetro deve ser equacionado em função da produtividade do sítio. No modelo derivado (5) com formulação GADA, tanto a assíntota a_1 como o parâmetro de forma a_3 podem ser considerados dependentes da qualidade local X e dada relação pode ser expressa da seguinte forma:

$$a_1 = e^{(X)}, \quad a_2 = b_2 + (b_3 / X), \quad a_3 = b_1 \quad (6)$$

Desse modo, para dois pares de valores altura-idade, a equação (5) é reescrita como:

$$\begin{aligned} H_0, t_0 &\Rightarrow H_0 = e^{(X)} \cdot (1 - e^{-b_1 t_0})^{b_2 + (b_3 / X)} \\ H_1, t_1 &\Rightarrow H_1 = e^{(X)} \cdot (1 - e^{-b_1 t_1})^{b_2 + (b_3 / X)} \end{aligned} \quad (7)$$

Em que:

H_0 = é a altura dominante na idade inicial t_0 ;

H_1 = é a altura dominante na idade t_1 .

Ao tomar logaritmos (ln) em ambos os lados da expressão (7), se obtém a

seguinte igualdade:

$$\ln(H_0) = X + b_2 + (b_3 / X) \ln(1 - e^{-b_1 t_0}) \quad (8)$$

Para essa equação, a solução de X implica encontrar as raízes de uma equação quadrática e selecionar a expressão da raiz mais apropriada para posteriormente substituí-la na segunda expressão do par de equações (7). Ao reordenar os termos da equação anterior obtém-se um polinômio de segundo grau em função de X , cujo valor se pode calcular. As soluções para X na equação (8) com valores de condições iniciais H_0, t_0 é:

$$X_0 = \frac{1}{2} \left[(\ln H_0 - b_2 L_0) + \sqrt{(\ln H_0 - b_2 L_0)^2 - 4b_3 L_0} \right] \quad (9)$$

Em que:

$$L_0 = \ln[1 - e^{-b_1 t_0}]$$

Ao selecionar a solução adequada de X_0 (neste caso a que envolve o valor positivo da raiz quadrada) e substituí-la na segunda igualdade das equações (7), se obtém a seguinte equação dinâmica em diferenças algébricas generalizadas (GADA) que resulta em curvas polimórficas com várias assíntotas:

$$H_1 = H_0 \left[\frac{1 - e^{-b_1 t_1}}{1 - e^{-b_1 t_0}} \right]^{b_2 + b_3 / X_0} \quad (10)$$

Todas as famílias de curvas obtidas com o método GADA são invariantes com relação ao caminho de simulação e a idade de referência.

2.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DA MODELAGEM

Foram avaliadas três estatísticas como critério de seleção do melhor modelo, sendo elas: o menor erro padrão da estimativa, em porcentagem ($S_{xy}\%$), maior coeficiente de determinação ajustado (R^2_{ajust}) e a melhor dispersão gráfica dos resíduos, em porcentagem ($R\%$), cujas fórmulas podem ser descritas de (11) a (16):

$$R^2 = 1 - \left(\frac{SQR}{SQT} \right) \quad (11)$$

$$R^2_{aj} = 1 - \left[(R^2) \frac{(n-1)}{(n-p)} \right] \quad (12)$$

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{SQR}{n-p}} \quad (13)$$

$$S_{yx}\% = \frac{S_{yx}}{\bar{y}} \cdot 100 \quad (14)$$

$$E_i = y_i - \bar{y}_i \quad (15)$$

$$E(\%) = \frac{E_i}{y_i} \cdot 100 \quad (16)$$

2.3 APLICAÇÃO DA KRIGAGEM ORDINÁRIA

A geoestatística define um conjunto de procedimentos matemáticos que permite reconhecer e descrever relações espaciais existentes entre pontos amostrados em um dado domínio.

Para Yamamoto e Landim (2013) a krigagem usa informações a partir do variograma para encontrar os pesos ótimos a serem associados às amostras com valores conhecidos que estimarão pontos desconhecidos. É entendida como uma série de técnicas de análise de regressão que procura minimizar a variância estimada a partir de um modelo prévio, que leva em conta a dependência estocástica entre os dados distribuídos no espaço.

O principal objetivo da krigagem é extrair para cada talhão do povoamento em estudo a área de cada sítio, a qual servirá para compor os estimadores estratificados do sistema de amostragem em rodízio.

Foi aplicada a krigagem ordinária para a modelagem espacial da variável índice de sítio, cuja expressão é:

$$Z_{krig}(X_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i [Z(x_i)] \quad (17)$$

Em que:

Z_{krig} = estimador para krigagem;

λ_i = ponderadores associados aos n dados;

$Z(x_i)$ = dados observados.

Os dados foram organizados em planilhas eletrônicas e os ajustes realizados no *software* R (R DEVELOPMENT CORE TEAM, 2009; ROBINSON; HAMANN, 2011) com uso do pacote adicional *geoR*, no qual foi formulado arquivo CSV específico, contendo as coordenadas (x, y) planas UTM (Universal Transversa de Mercator) no sistema de referência SIRGAS 2000, computadas as distâncias entre os pontos amostrais e, por fim, como variável dependente Z o valor numérico do sítio na idade-referência de 7 anos para cada unidade amostral. Para gerar os mapas temáticos foi utilizado o *software* Arc Gis 10.2.

As estimativas foram obtidas por meio do semivariograma ajustado, aplicando os modelos teóricos: esférico (18), exponencial (19) e gaussiano (20) (PELLISSARI, 2015).

$$\gamma(h) = \begin{cases} \frac{C_0 + C \left[\left(\frac{3}{2} \right) \cdot \left(\frac{h}{A} \right) - \left(\frac{1}{2} \right) \cdot \left(\frac{h}{A} \right)^3 \right]}{C_0 + C} & \text{para } h \leq A \\ & \text{para } h > A \end{cases} \quad (18)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C(1 - e^{-h/A}) \quad (19)$$

$$\gamma(h) = C_0 + C(1 - e^{-h^2/A^2}) \quad (20)$$

Em que:

$\gamma(h)$ = semivariância da variável altura dominante na idade de referência $Z(x_i)$;

h = distância expressa em metros;

C_0 = efeito pepita;

C = variância *à priori*;

A = alcance.

Avaliou-se a qualidade do ajuste dos modelos a partir do coeficiente de determinação (R^2), soma dos quadrados dos desvios ponderados (SQDP). O grau de dependência espacial (GDE) da variável índice de sítio foi estimado por meio da eq. 21.

$$GDE = \frac{C_0}{C_0 + C} \cdot 100 \quad (21)$$

Por fim, a validação cruzada foi utilizada para conferir as comparações entre o conjunto de dados observados ($Z(x_i)$) e estimados ($Z_{est}(x_i)$), com ajuste da equação da reta (22).

$$Z(x_i) = \theta_1 + \theta_2 \cdot Z_{est}(x_i) \quad (22)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CLASSIFICAÇÃO DE SÍTIO

Todos os parâmetros dos modelos ajustados pelos métodos: curva guia (GC), diferenças algébricas (ADA) e diferenças algébricas generalizadas (GADA) geraram coeficientes significativos a 95% de probabilidade. Como esperado, o modelo de curva guia apresentou os menores valores de coeficiente de determinação ($R^2_{ajust} = 0,753 \sim 0,755$) e de precisão ($S_{yx}\% = 8,62 \sim 8,65\%$). Os modelos ajustados pelo método das diferenças algébricas apresentaram resultados com melhora significativa de correlação ($R^2_{ajust} = 0,778 \sim 0,807$) e de precisão ($S_{yx}\% = 5,60 \sim 6,02\%$). Ao passo que o modelo de Chapman, ajustado pelo método das diferenças algébricas generalizadas, propiciou as melhores estimativas de correlação ($R^2_{ajust} = 0,899$) e de precisão ($S_{yx}\% = 4,92\%$) (TABELA 2.4).

TABELA 2.4 – COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS DE MODELOS PARA CLASSIFICAÇÃO DE SÍTIOS FLORESTAIS DE *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.

Método	Modelo N°	Equação funcional	S_{yx} (m)	S_{yx} %	R^2_{ajust}
GC	(1)	$h_{dom} = S. \left[\frac{1 - e^{(-0,2356 \cdot t_0)}}{1 - e^{(-0,2356 \cdot t)}} \right]^{-0,13477}$	2,01	8,65	0,753
GC	(2)	$h_{dom} = S. \left(\frac{1 - e^{-0,0002 \cdot t_0^{4,1548}}}{1 - e^{-0,0002 \cdot t^{4,1548}}} \right)^{0,1303}$	2,01	8,62	0,755
ADA	(3)	$h_{dom2} = S. \left[\frac{1 - e^{(-0,0174 \cdot t)}}{1 - e^{(-0,0174 \cdot t_0)}} \right]^{-0,8552}$	1,49	6,02	0,778
ADA	(4)	$h_{dom} = 32,9630 \cdot \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{S}{32,9630} \right)^{\frac{1}{1,1020}} \right]^{\frac{t_0}{t}} \right\}^{1,1020}$	1,39	5,60	0,807
GADA	(5)	$H_1 = H_0 \left[\frac{1 - e^{(-0,9361t)}}{1 - e^{(-0,9361t_0)}} \right]^{1,6256 + 7,0417 / X_0}$ $X_0 = \frac{1}{2} \left[\frac{(\ln H_0 - 1,6256 L_0) + \sqrt{(\ln H_0 - 1,6256 L_0)^2 - 4 \cdot 7,0417 L_0}}{\ln[1 - e^{-0,9361 t_0}]} \right]$ $L_0 = \ln[1 - e^{-0,9361 t_0}]$	1,22	4,92	0,899

A distribuição gráfica dos resíduos (Figura 2.2) indicam maior homogeneidade a medida que os povoamentos aproximam-se da idade técnica de corte para todos os métodos de construção das curvas. Entretanto, é perceptível que o método GADA propicia este efeito de maneira mais acentuada, comprovando a eficiência deste método na classificação da capacidade produtiva.

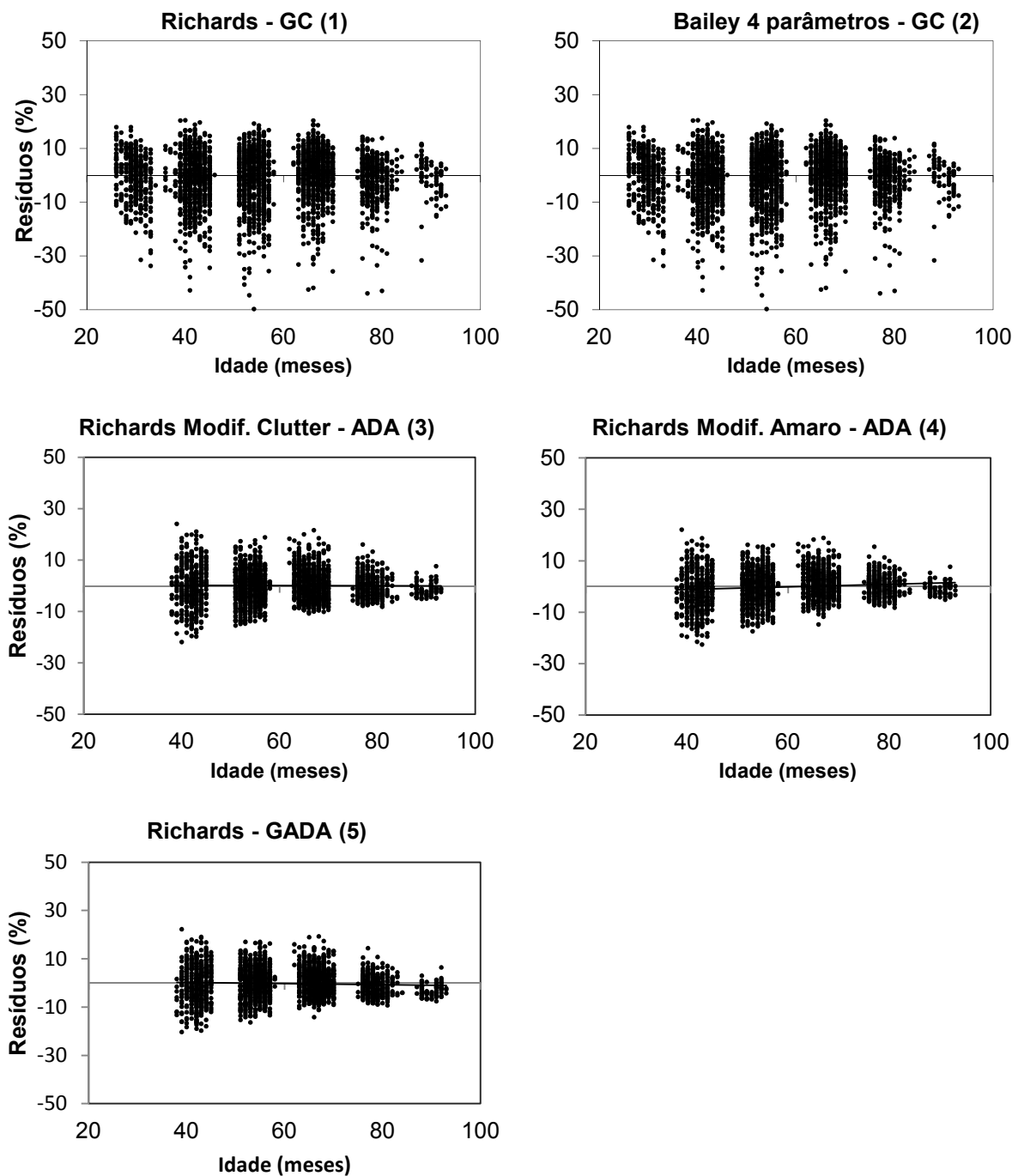


FIGURA 2.2 – DISTRIBUIÇÃO RESIDUAL DOS MODELOS DE CLASSIFICAÇÃO DE SÍTOS FLORESTAIS EM POVOAMENTOS DE *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.
FONTE: O autor (2015).

De modo geral, os cinco modelos ajustados apresentam estatísticas apropriadas de correlação, precisão e distribuição residual. No entanto, é notório que a metodologia de curva guia (GC) apresenta as maiores dispersões residuais, variando entre -45 e 25%, ou seja, os piores resultados. As distribuições para as metodologias das diferenças algébricas (ADA) e diferenças algébricas generalizadas (GADA) apresentam dispersão residual balanceada e mais aderente à variação dos dados, cujos valores situam-se entre -22 e 23% para ADA, e entre -20 e 20% para GADA.

Avaliando a curva média gerada para cada metodologia (GC, ADA e GADA), não são constadas diferenças no padrão de curvatura, escala e ponto assintótico, exceto para o modelo de Bailey ajustado pelo método da curva guia, que apresenta uma assíntota horizontal em idade mais precoce que os demais modelos ajustados (FIGURA 2.3).

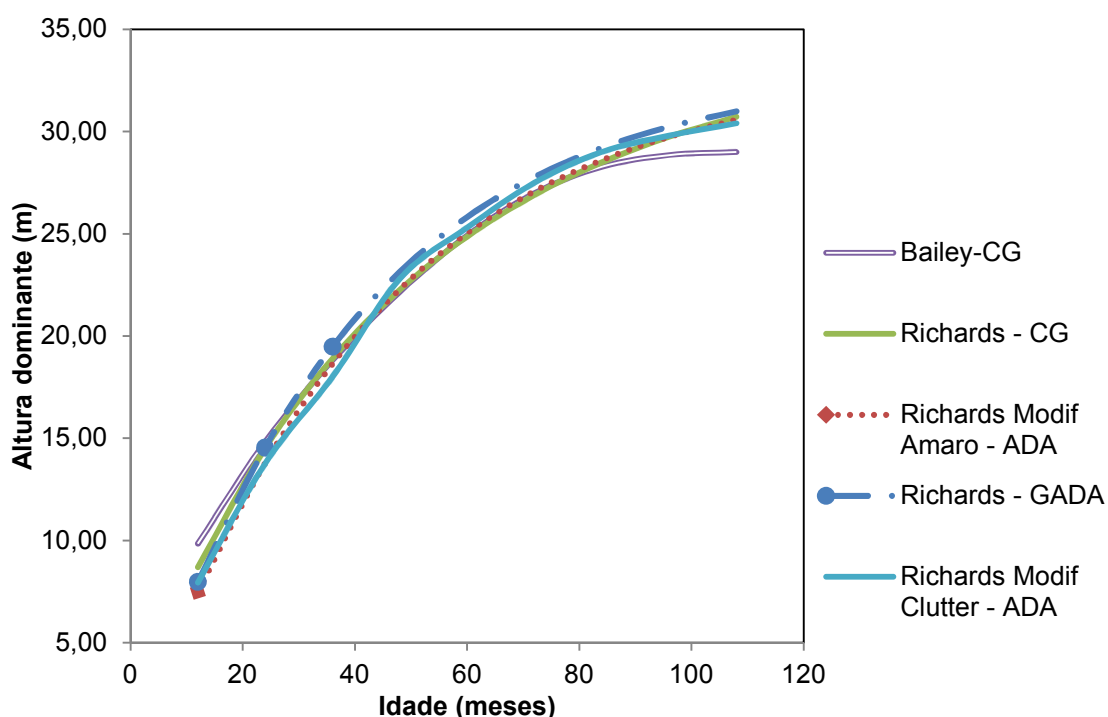


FIGURA 2.3 – CURVAS MÉDIAS DE SÍTIO DOS CINCO MODELOS AJUSTADOS PARA POVOAMENTOS DE *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.
FONTE: O autor (2015).

As metodologias avaliadas produziram resultados semelhantes entre si, no entanto, o método GADA gerou resultados com menor erro padrão da estimativa, maior correlação e melhor dispersão residual, sendo 12,23% superior à metodologia

ADA e 39,80% em relação à GC.

Levando em consideração esta avaliação, o modelo de Richards ajustado pelo método das diferenças algébricas generalizadas (GADA) foi o que melhor representou os dados em estudo, sendo, portanto, o modelo escolhido para gerar as classes de sítio.

As curvas polimórficas de sítio elaboradas por meio do modelo de Richards – GADA e as observações dos quatro anos de inventário florestal (Inv_11 a Inv_14) podem ser observadas na (FIGURA 2.4). O povoamento foi classificado em dois sítios (I e II), dado sua homogeneidade e a estratégia a ser adotada para empregar a amostragem em rodízio.

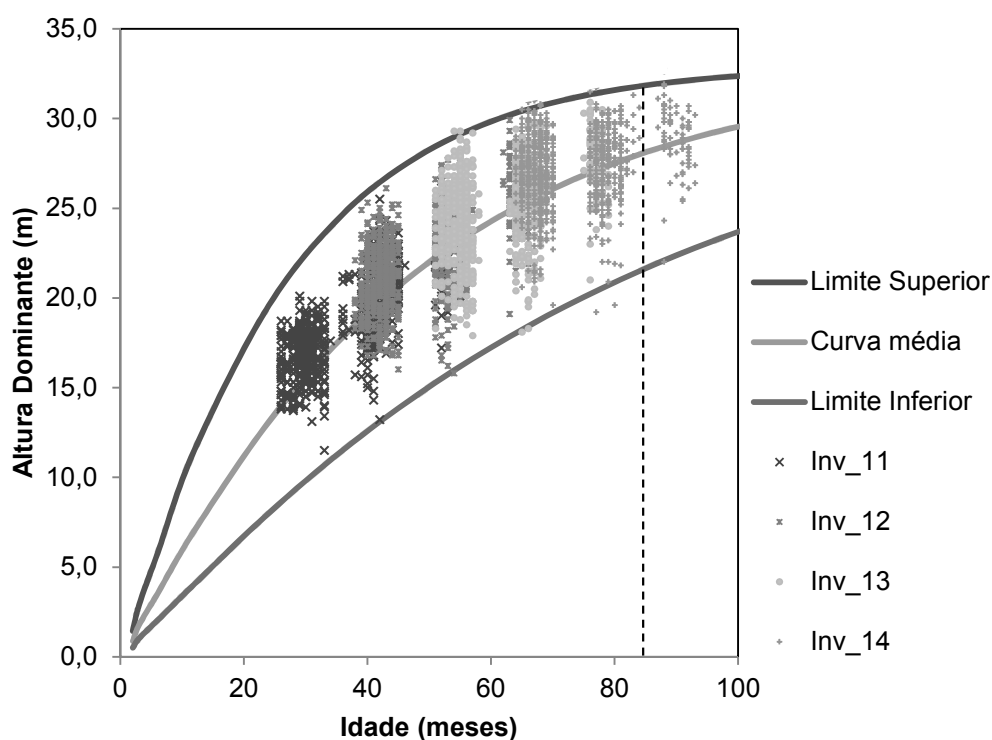


FIGURA 2.4 – CLASSES DE SÍTIO PARA POVOAMENTOS DE *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.
FONTE: O autor (2015).

Segundo Scolforo (1993), uma comprovação de que a proporcionalidade entre as curvas de índice de sítio é uma falha, é que em sítios mais produtivos a curva de crescimento em altura tende a ter forma sigmoide mais pronunciada. Já em sítios menos produtivos, o padrão de crescimento da altura tende a ser mais “alisado”, ou seja, o ponto de inflexão é atingido mais tarde que os dos sítios mais produtivos. Os modelos polimórficos produzem, portanto, curvas mais apropriadas ao realismo biológico do crescimento.

A diferença da produtividade entre as classes de sítio e a culminação assintótica precoce deve-se aos fatores edáficos da região, uma vez que predominam os solos de areia quartzosa de baixa fertilidade natural, formados por manchas de Neossolo Quartzarênico, com teores de argila inferiores a 10% (EMBRAPA, 2006). Outro fato preponderante é a escolha dos materiais genéticos, dado ser uma região pioneira, onde os primeiros ciclos produtivos estão se completando pela primeira vez.

Com a determinação da amplitude da altura dominante observada na idade de referência de sete anos, foram confeccionadas duas curvas de índice de sítio, respectivamente nos valores de centro de classe iguais a 29,9 m para o sítio I e 24,8 m para o sítio II, cujos limites inferior e superior e de centro de classe estão apresentados na (TABELA 2.5).

TABELA 2.5 – VALORES DOS LIMITES SUPERIOR (LS) E INFERIOR (LI) E DE CENTRO (C) DAS CLASSES DE ÍNDICE DE SÍTIO PARA *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.

Idade (ano)	Classes de sítio					
	I			II		
	LS (m)	C (m)	LI (m)	LS (m)	C (m)	LI (m)
1	11,5	8,7	7,1	7,1	5,3	4,1
2	19,6	15,6	13,1	13,1	10,2	8,0
3	24,7	20,6	17,8	17,8	14,3	11,5
4	27,9	24,2	21,5	21,5	17,7	14,6
5	29,8	26,8	24,3	24,3	20,5	17,2
6	31,0	28,6	26,4	26,4	22,9	19,5
7	31,8	29,9	28,0	28,0	24,8	21,5
8	32,3	30,8	29,2	29,2	26,3	23,2
9	32,5	31,4	30,1	30,1	27,5	24,6

Em que: LS = limite superior; LI = limite inferior; e C = centro de classe de sítio.

FONTE: O autor (2015).

Uma característica desejável é que os dados se mantenham em uma mesma classe de sítio ao longo das mensurações (DAVID, 2014; Clutter *et al.*, 1983). As médias das alturas dominantes em suas respectivas idades de mensuração estão apresentadas na (FIGURA 2.5), na qual é comprovada a estabilidade das parcelas dentro da mesma classe de sítio entre as mensurações

2011, 2012, 2013 e 2014.

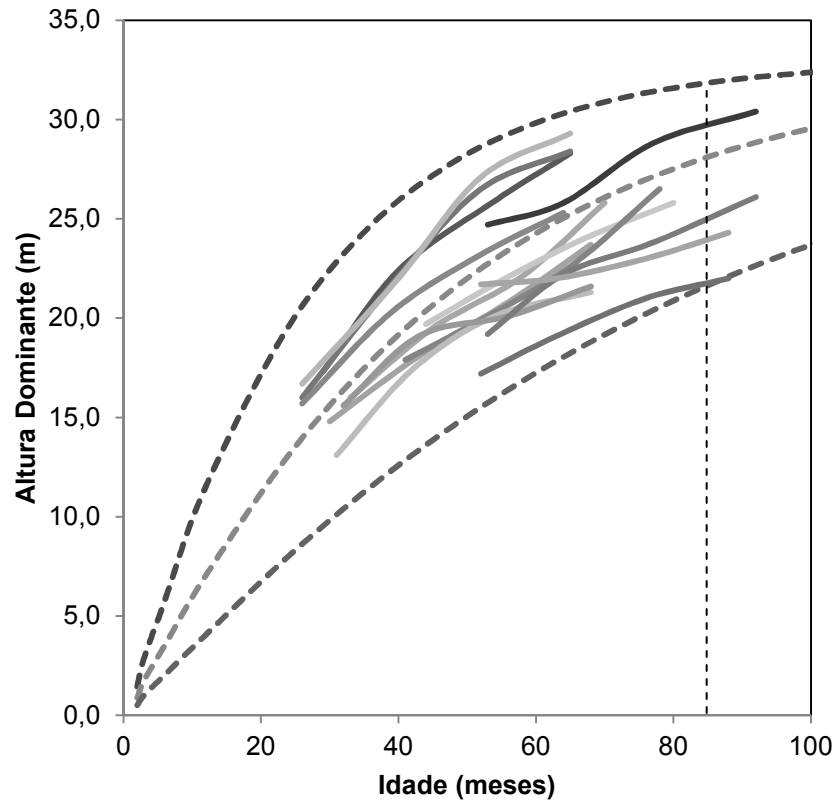


FIGURA 2.5 – COMPORTAMENTO ESTÁVEL DAS ALTURAS DOMINANTES EM UMA MESMA CLASSE DE SÍTIO PARA *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.
FONTE: O autor (2015).

3.2 KRIGAGEM ORDINÁRIA

Na Tabela 2.6 estão apresentados os ajustes dos semivariogramas para a altura dominante na idade de referência de 7 anos (h_{dom}) para os modelos exponencial, esférico e gaussiano, onde foi constatado um alto grau de dependência espacial ($GDE > 0,75$). Tal conclusão possibilita a aplicação das técnicas geoestatísticas de krigagem ordinária para a modelagem dessa variável (PELISSARI, 2015).

TABELA 2.6 – RESULTADOS DOS SEMIVARIOGRAMAS AJUSTADOS PARA HDOM NA IDADE DE REFERÊNCIA EM *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.

Modelo	Efeito Pepita (C_0)	Contribuição (C)	Alcance (A(m))	Grau de Dependência Espacial GDE (%)	R^2	SQDP
Exponencial	0,989	3,291	795,37	76,9%	0,94	0,0002
Esférico	1,101	3,179	823,10	74,3%	0,86	0,0006
Gaussiano	1,127	3,153	812,30	73,8%	0,90	0,0004

Em que: R^2 : Coeficiente de Determinação; SQDP: Soma de Quadrados dos Desvios Ponderados.
 FONTE: O autor (2015).

O modelo exponencial resultou em um maior grau de dependência espacial (GDE=76,9%), considerado forte quando maior ou igual a 75% (PELISSARI, 2015; CAMBARDELLA *et al.* 1994), menor efeito pepita ($C_0=0,989$), maior coeficiente de determinação ($R^2=0,94$) e menor soma de quadrados dos desvios ponderados (SQDP=0,0002). Esses resultados confirmam a alta dependência espacial da variável em estudo, corroborando positivamente para estimativas apropriadas dos locais não amostrados, para delimitação e quantificação de área dos sítios nas áreas do domínio em estudo. Adicionalmente, é apresentado na Figura 2.6 o semivariograma ajustado para o modelo exponencial, no qual ficam explícitas suas características apropriadas para representar os dados do povoamento.

O modelo exponencial foi utilizado para elaboração da krigagem ordinária, do qual após sua conclusão, os valores preditos e observados foram utilizados para elaboração da validação cruzada (TABELA 2.7).

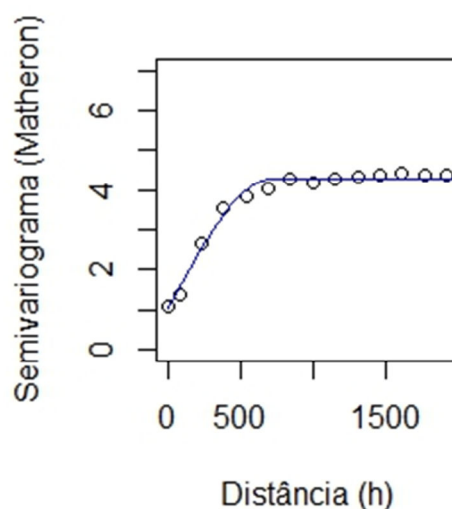


FIGURA 2.6 – SEMIVARIOGRAMAS DO MODELO EXPONENCIAL PARA *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.

FONTE: O autor (2015).

Na validação cruzada (TABELA 2.7), o valor de $R^2 = 0,64$ encontra-se próximo ao ideal ($>0,70$). Resultados semelhantes foram obtidos em PELISSARI (2015). Apesar de um R^2 abaixo do esperado, as estimativas para a variável dependente resultou em um erro padrão da estimativa ($S_{yx}\%$) menor que 10%, considerando, portanto, adequado para representar o domínio em estudo.

TABELA 2.7 – RESULTADOS DA VALIDAÇÃO CRUZADA PARA O MODELO EXPONENCIAL PARA *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.

Modelo	Coefficiente linear	Coefficiente Angular	Número de Vizinhos	R^2	$S_{yx}\%$
Exponencial	2,8753	0,8757	6	0,64	5,25%

Em que: R^2 : Coeficiente de Determinação; $S_{yx}\%$: Erro padrão da Estimativa relativo.

FONTE: O autor (2015).

Após validação da krigagem ordinária e do modelo exponencial, foram geradas as rotinas de processamento para criação do mapa temático (Figura 2.7) e do computo de áreas por unidade anual de produção (UAP), compartimentos, talhões e classes de sítio. Na tabela 2.8 é apresentado o resumo de áreas por UAP e sítio, com seus respectivos pesos participativos (W_{Sj}). As demais proporcionalidades serão apresentadas no capítulo III, que tratará especificamente da amostragem em rodízio.

TABELA 2.8 – RESUMO DE ÁREAS POR UAP E SÍTIO PARA *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.

UAP	Sítio	Área (hectare)	Peso W_{Sj}
2,5	SI	516,43	24,5%
	SII	568,54	26,9%
3,5	SI	507,42	24,0%
	SII	330,16	15,6%
4,5	SI	180,09	8,5%
	SII	8,04	0,4%
Total	-	2.110,66	100,0%

FONTE: O autor (2015).

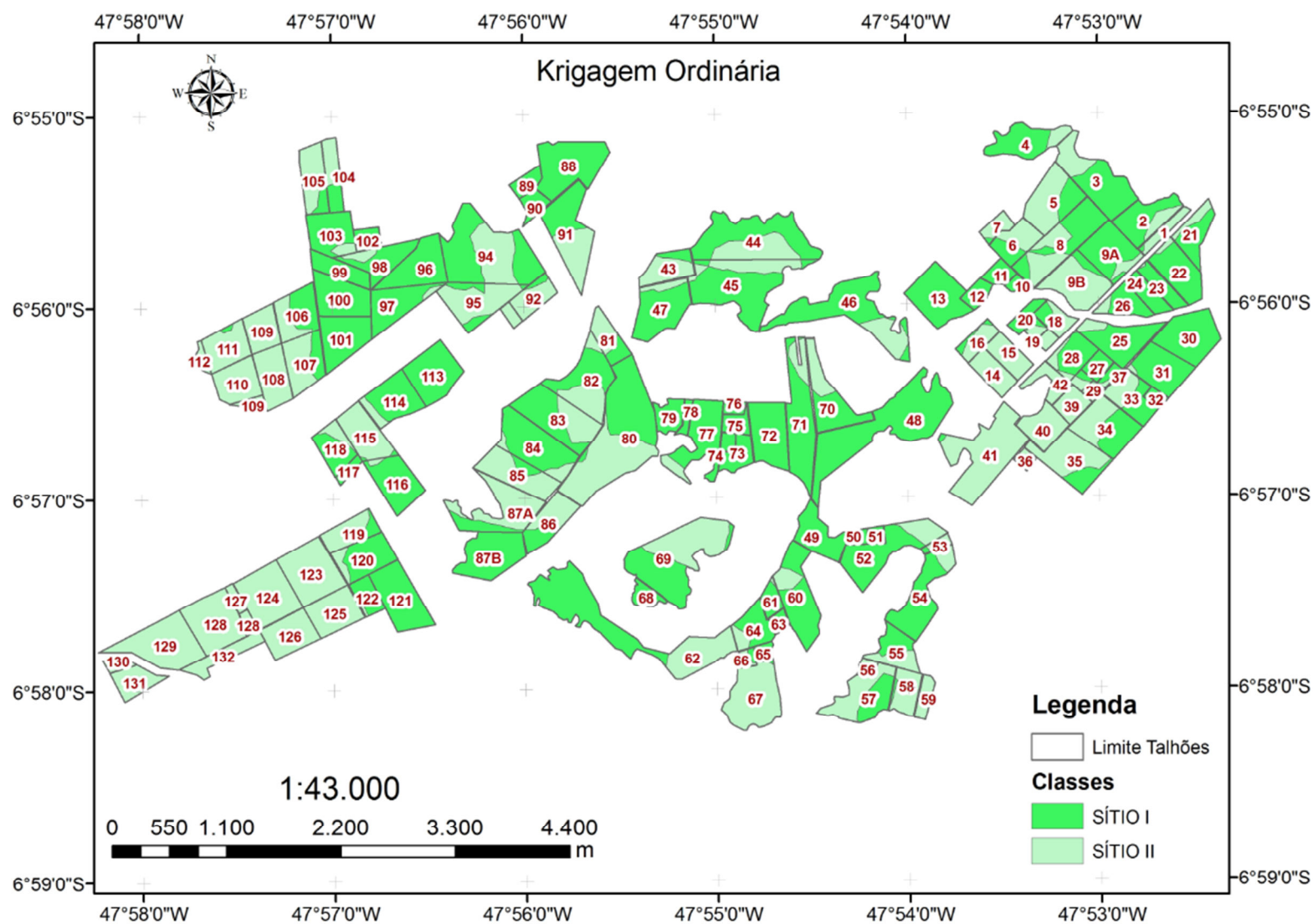


FIGURA 2.7 – MAPA TEMÁTICO DA CLASSIFICAÇÃO DE SÍTIO COM BASE NA KRIGAGEM ORDINÁRIA PARA *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.

FONTE: O autor (2015).

4. CONCLUSÕES

Considerando os ajustes da classificação de sítios florestais e uso da krigagem ordinária para povoamentos de *Eucalyptus* sp. em região tropical do Brasil, é possível concluir que:

Todos os modelos testados são apropriados para descrever o comportamento de crescimento da altura dominante em diferentes idades e graus de produtividade, no entanto, o modelo de Chapman-Richards, ajustado pelo método das diferenças algébricas generalizadas (GADA) se apresentou mais flexível e apropriado estatisticamente, sendo superior ao método da curva guia e das diferenças algébricas.

A altura dominante apresenta estrutura de continuidade espacial, permitindo a interpolação apropriada das classes de produtividade do povoamento. A krigagem ordinária, com uso do modelo exponencial apresenta o melhor desempenho, com alto grau de dependência espacial, sendo uma ferramenta eficiente para delimitar geograficamente as classes de sítio e permitir o cálculo de área estratificada ao nível de capacidade produtiva local.

5. RECOMENDAÇÕES

Os resultados apresentados nesta pesquisa demonstram a eficiência superior do método GADA para a determinação da capacidade produtiva, sendo recomendado seu emprego, por ser mais flexível, invariante quanto a idade de referência e caminho da simulação, apresentar concomitantemente a possibilidade de se obter curvas polimórficas ou anamórficas e por expressar mais de um parâmetro em função do sítio numa mesma equação.

As curvas geradas e/ou os coeficientes dos modelos poderão ser empregados em regiões tropicais do Brasil com características edafoclimáticas semelhantes de forma confiável, dado o horizonte de mensuração das Unidades Amostrais utilizadas no ajuste abrangerem as idades de 2 a 8 anos e todas as classes de sítio.

O emprego das curvas para povoamentos com idade precoce, inferior a 3 anos deverá ser utilizada com cautela, dado a possível influência dos tratamentos silviculturais e de adubação.

As técnicas de geoestatística se mostraram uma ferramenta indispensável para os inventários florestais, pois agrega à classificação de sítio tradicional a possibilidade de gerar inferências precisas sobre a altura dominante, nos locais não avaliados em campo, dado seu alto grau de dependência espacial. Recomenda-se o uso da krigagem ordinária para zonear, delimitar e calcular áreas por classe de sítio em povoamentos de *Eucalyptus* sp. Ademais, outras variáveis poderão ser testadas para diferenciar a capacidade produtiva, como características físicas e químicas do solo, precipitação, evapotranspiração diferencial, amplitudes e médias térmicas e outras.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, L. O. **Biometria Florestal Aplicada**. Ed. pelo autor. Três Barras, SC, 189 p., 2004.

ASSMANN, E. **The Principles of Forest Yield Study**. Pergamon Press Ltd. Oxford, England. 506 p., 1970.

BAILEY, R. L.; CLUTTER, J. L. Base-age invariant polymorphic site curves. **Forest Science**, Bethesda, v. 20, p. 155-159, 1974.

BATISTA, J. L.; COUTO, H. T. Z. Escolha de modelos matemáticos para a construção de curvas de índice de sítio para florestas implantadas de *Eucalyptus sp.* no estado de São Paulo. **IPEF**, v. 32 p. 33-41, 1986.

BOGNOLA I. A., LINGNAU, C., LAVORANTI, O. J., HIGA, A. R., STOLLE, L., OLIVEIRA, E. B., FRANCISCON, L. Modelagem da variabilidade espacial do rendimento produtivo de *Pinus taeda* L. com uso da geoestatística. Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, INPE p. 3591-3596.

BURKHART, H. E., TOMÉ, M. **Modeling Forest Trees and Stands**, Springer, Dordrecht, 457 p., 2012.

CAMBARDELLA, C. A., MOORMAN, T. B., NOVAK, J. M., PARKIN, T. B., KARLEN, D. L., TURCO, R. F., KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. *Soil Sci. Soc. of Am. J.*, Madison, v. 58, n. 5, p. 1501-1511., 1994.

CHAPMAN, D. G.. Statistical problems in population dynamics. In: Neyman, J., ed. *Proceedings of the fourth Berkeley symposium on mathematical statistics and probability*. v. 4. Berkeley, CA: University of California p. 153-186., 1961.

CIESZEWSKI C J. Three methods of deriving advanced dynamic site equations demonstrated on inland Douglas-fir site curves. *Can. Forest Science*. p. 31:165-173., 2001.

CIESZEWSKI, C. J. Comparing fixed and variable-base age site equations having single versus multiple asymptotes. *Forest Science*, Bethesda, v. 48, p. 7-23, 2002.

CIESZEWSKI, C. J. Developing a well-behaved dynamic site equation using a modified Hossfeld IV function $Y_3 = (axm)/(c + xm-1)$, a simplified mixed-model and scant subalpine fir data. *Forest Science*. v. 49, p. 539-554., 2003.

CIESZEWSKI, C. J., STRUB, M. Generalized algebraic difference approach derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes from exponential and logarithmic functions. **Forest Science** v. 54 p.303-315. 2008.

CIESZEWSKI, C.; BAILEY, R. L. Generalized Algebraic Difference Approach: Theory based derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable

asymptotes. **Forest Science**. v46, p. 116-126, 2000.

CIESZEWSKI, C.; BAILEY, R. L. Generalized Algebraic Difference Approach: Theory based derivation of dynamic site equations with polymorphism and variable asymptotes. **Forest Science**. v46, p. 116-126, 2000.

CLUTTER, J. L. *et al.* **Timber management: a quantitative approach**. New York: Wiley & Sons, 333 p., 1983.

DAVID, H. C. **Avaliação de sítio, relação dendrométrica e otimização de regimes de manejo de *Pinus taeda* L. nos estados do Paraná e Santa Catarina**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. 152 p., 2014.

MELLO, J. M.; OLIVEIRA, M. S., BATISTA, J. L. F., RIBEIRO JÚNIOR, P. J., KANEGAE JUNIOR, H. Uso do estimador geoestatístico para predição volumétrica por talhão. **Floresta**, Curitiba, v. 36, n. 2, p. 251- 260, 2006.

PECE DE RIOS, M. G. V. **Um modelo de crescimento e produção aplicado a plantações de *Eucalyptus pellita***. Viçosa: UFV, 1993. 89p. (Tese MS).

PÉLLICO NETTO, S.; STEFANELLO, F. R.; PELLISSARI, A. L.; DAVID, H. C. Mapping of sites in Forest stands. An. **Acad. Bras. Cienc.**, Rio de Janeiro, v. 86, n. 4, 2025-2037, 2014.

PELLISSARI, A. L. **Geoestatística aplicada ao manejo de povoamentos de *Tectona grandis* L. f.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná. 119 p., 2015.

R DEVELOPMENT CORE TEAM R: **a language and environment for statistical computing**. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07- 0, URL <http://www.R-project.org>, 2009

RICHARDS, F.J. A flexible growth function for empirical use. *Journal of Experimental Botany*, Oxford, v. 10, p. 290-300, 1959.

ROBINSON, A. P., HAMANN, J. D. **Forest Analytics with R, An Introduction**. New York, Springer. 339 p., 2011.

SCOLFORO, J. S. R. **Mensuração florestal**: Avaliação de produtividade florestal através da classificação do sítio. ESAL/FAEPE, Lavras, p. 451, 1993.

SCOLFORO, J. S. R. **Modelagem do crescimento e da produção de florestas plantadas e nativas**. UFLA/FAEPE, Lavras, p. 451, 1998.

CAPÍTULO II

MÉTODO DE AMOSTRAGEM COM PROBABILIDADE PROPORCIONAL À ÁREA VARIÁVEL EM POVOAMENTOS DE *Eucalyptus dunnii* MAIDEN EM TRÊS BARRAS, SC.

RESUMO

Vários métodos de amostragem são conhecidos na literatura, nos quais o destaque teórico entre eles é o critério probabilístico de seleção das árvores que vão participar da unidade amostral. O objetivo do presente trabalho foi apropriar a estrutura teórica do método de amostragem cuja seleção dos indivíduos na população é efetuada com probabilidade proporcional a uma área média variável (*PPAV*) de ocupação na unidade amostral. Dados de um inventário florestal de *Eucalyptus dunnii* Maiden não desbastado, com área total de 123,90 ha, localizado em Três Barras, planalto norte de Santa Catarina foi utilizado para testar o método de amostragem. Ao todo foram mensuradas no ano de 2015, 41 unidades amostrais permanentes, alocadas aleatoriamente na população, com dimensões de 6 entrelinhas por 10 plantas na linha de plantio. Os talhões inventariados possuem idade próxima de 6,2 anos e espaçamento de 4.0 x 3.0m. Para comparar o método *PPAV* com o método tradicional de área fixa (*PPA*), um talhão, com espaçamento de 4,5x3,0m, contíguo ao mesmo povoamento, com área total de 7,302 ha, foi imageada com alta resolução espacial (0,25m) por Veículo Aéreo não Tripulado (VANT), permitindo a enumeração total dos indivíduos vivos (censo) com a contagem de copas. Para essa fração foram ainda mensuradas 7 unidades amostrais com o método *PPAV* e 7 unidades amostrais com o método *PPA*, permitindo o comparativo do volume total obtido pelo censo *versus* *PPAV* e censo *versus* *PPA*. Como efeito comparativo entre o embasamento teórico para tal desenvolvimento surgiu da constatação de que várias empresas florestais no Brasil passaram a utilizar em seus Inventários Florestais Contínuos - *IFCs* unidades amostrais de tamanhos variáveis, principalmente para evitar a ocorrência de árvores marginais e também para a obtenção de estimadores mais consistentes no *IFC*. A presente proposta metodológica, identificada como método de amostragem *PPAV* gera estimativas dos parâmetros que caracterizam a população florestal com menor custo, se torna mais eficaz que a amostragem efetuada com *UAs* de área fixa pela praticidade e facilidade operativa de sua delimitação em campo, conferindo estimativas apropriadas e mais precisas da área média de ocupação (m²) de cada indivíduo na população. O volume total do talhão obtido em função do censo, quando comparado ao método *PPAV* não apresentou diferenças significativas ao nível de 99% de probabilidade, ao passo que o método de área fixa apresentou-se diferente estatisticamente ao nível de 95% de probabilidade, resultando em superestimativa de 7,5% maior que o encontrado no censo.

Palavras-chave: Amostragem ppt, área fixa, inventário florestal.

CHAPTER II

SAMPLING METHODS WITH PROBABILITY PROPORTIONAL TO THE VARIABLE AREA IN STANDS OF *Eucalyptus dunnii* MAIDEN IN TRÊS BARRAS, SANTA CATARINA STATE.

ABTRACT

Several sampling methods are known in the literature, in which the theoretical difference among them is the probabilistic criterion for selecting the trees to be included in the sampling unit (SU). The objective of this study was to appropriate the theoretical sampling structure whose selection of individuals in the population is made with probability proportional to a variable average area (PPVA) of its occupation in the SU. Data from a forest inventory of *Eucalyptus dunnii* Maiden, without tinning, with total area of 123.90 ha, located in Três Barras, north plateau of Santa Catarina State, was used to test the sampling method. Altogether in 2015, 41 permanent sampling units, randomly selected in the population, with dimensions of 6 lines by 10 plants in the planting line were measured. The inventory stands have approximate 6.2 years old and 4.0 x 3.0m of spacing between plants. To compare PPVA method with the traditional fixed area method PPA, a stand, spaced 4,5x3,0m, contiguous to the same stand with total area of 7,302 ha, was imaged with high spatial resolution (0.25m) by an unmanned aerial vehicle (UAV), allowing full list of living individuals (census) with crown counts. To this fraction, 7 sample units with PPVA method and 7 sample units with the PPA method were also measured, allowing the comparison of the total volume obtained by the census versus PPVA and PPA. For comparison purposes between the theoretical foundations of this development came from the fact that many forest companies in Brazil started to use in their Continuous Forest Inventories - CFI sampling units of varying sizes, mainly to avoid the occurrence of marginal trees and also to obtain more consistent estimators in the CFI. This methodological approach, identified as PPAV sampling method produces parameter estimates that characterize the forest population at a lower cost; it becomes more effective than sampling with fixed area plots because they are practical and operationally ease of delimitation in the field, providing appropriate estimates and more accurate average occupational area for each individual tree (m²) in the population. The total volume of the stand, obtained according to the census, compared to PPAV method showed no significant differences at 99% probability level, while the fixed area method was statistically different at 95% probability, resulting in a overestimation of 7.5% on that found in the census.

Keywords: Sampling ppt, fixed area, forest inventory.

1. INTRODUÇÃO

Vários métodos de amostragem são conhecidos na literatura, nos quais o destaque teórico entre eles é o critério probabilístico de seleção das árvores que vão participar da unidade amostral.

Este campo da teoria de amostragem foi inovado a primeira vez por Bitterlich, quando ele propôs uma unidade amostral na qual as árvores são selecionadas com probabilidade proporcional ao quadrado dos diâmetros tomados à altura do peito ($d_{1,30}^2$), a partir de um ponto de visada, Bitterlich (1948). Seu método de amostragem passou a ser denominado, principalmente nos Estados Unidos, como Amostragem por Pontos (*Point Sampling*).

Outros autores o seguiram variando o critério probabilístico de seleção das árvores, distinguindo-se entre eles Strand (1958), com a proposta de amostrar as árvores ao lado de uma linha de comprimento L , demarcada dentro da floresta, cuja seleção se faz com probabilidade proporcional ao seu diâmetro ($d_{1,30}$), para a obtenção da estimativa da área basal e proporcional à altura das árvores (h), para a obtenção da estimativa do volume por hectare; Prodan (1965) propôs o método de seleção das árvores proporcional ao quadrado do raio da 6ª árvore tomada em uma unidade amostral circular (r_6^2).

Esses métodos amostrais distinguem-se pelo critério probabilístico de seleção das árvores que participam das respectivas unidades amostrais propostas e foram genericamente denominados de amostragem com seleção probabilística proporcional a um tamanho (ppt), e têm sido atribuídos aos autores que os desenvolveram.

Destacam-se, ainda, na literatura algumas concepções propostas para estudos ecológicos espaciais das espécies, como o método dos quadrantes, no qual a seleção probabilística das árvores é feita proporcional ao raio da árvore mais próxima do centro de um círculo r_i , acrescida da restrição de aplicação do critério em quadrantes, ou seja, a unidade amostral circular é fracionada em quatro subunidades, configurando-se subamostragem e, neste caso, eles formam um conglomerado com um indivíduo por subamostragem (COTTAM; CURTIS 1956).

Detalhamento teórico e aplicativo dos métodos amostrais anteriormente mencionados encontram-se apresentados em Péllico Netto e Brena (1997). Sua

utilização em levantamentos florestais se dá em função da utilização dos resultados por eles gerados. Por exemplo, se qualquer uma dessas unidades amostrais for proposta como parcela permanente em inventários florestais contínuos, pode gerar restrições, como modificações da participação das árvores na unidade amostral em medições sucessivas, dificuldades de caracterização de alturas dominantes, superestimativas em área basal e volume por hectare nos inventários florestais, resultantes, na maioria das vezes, pela baixa participação de indivíduos nas unidades amostrais, entre outras. É por esse motivo que as empresas florestais em todo o mundo preferem usar as unidades amostrais de área fixa para evitar tais restrições.

Em algumas empresas no Brasil surgiu uma ideia variante do método de área fixa, cujas unidades amostrais – UAs passam a ser variáveis porque são tomadas seis ou mais linhas no plantio com 10 plantas na linha, ou seja, sessenta covas aproximadamente se forem tomadas seis linhas apenas. Nessas circunstâncias, as linhas 1 e 6 da UA sempre terão 10 árvores cada, porém nas linhas de 2-5 nem sempre isso ocorre, dado que a disposição espacial das árvores em cada linha de plantio poderão variar, principalmente devido às condições operacionais de plantio e de relevo no interior da UA. Ainda, as empresas decidiram, por questões de consistência estatística dos estimadores amostrais, evitar totalmente a ocorrência de árvores marginais, dado que no método de amostragem de Área Fixa a tratativa desse problema é feita de maneira aproximativa.

1.1 OBJETIVO GERAL

Apropriar a estrutura teórica do método de amostragem cuja seleção dos indivíduos na população é efetuada com probabilidade proporcional a uma área média variável (PPAV) de ocupação na unidade amostral.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Apresentar os estimadores de amostragem com base no critério probabilístico proporcional a uma área média de ocorrência dos indivíduos na unidade amostral.
- Apresentar a aplicação do método a dados de um inventário florestal contínuo.
- Comparar o método de área variável (PPAV) com o método de área fixa para gerar os estimadores de densidade e volume.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 DESCRIÇÃO DOS DADOS PARA EXEMPLIFICAR O MÉTODO DE ÁREA VARIÁVEL

Ao todo foram mensuradas 41 parcelas permanentes, com dimensões de 6 entrelinhas por 10 plantas na linha de plantio, perfazendo uma área amostral variável média de 629,01m² (TABELA 3.1). Os talhões inventariados possuem idade próxima de 6,2 anos, espaçamento de 4,0x 3,0m e uma área total de 123,90 hectares.

TABELA 3.1 – DADOS DOS TALHÕES E UNIDADES AMOSTRAIS DE *Eucalyptus dunnii* MAIDEN EM TRÊS BARRAS, PLANALTO NORTE CATARINENSE.

Talhão	Data de Plantio	Idade (anos)	N de Unidades Amostrais	Média de N. covas	Área média das Unidades Amostrais (m ²)
02	30/04/2009	6,1	2	64	641,23
03	16/03/2009	6,3	2	62	621,27
08	26/02/2009	6,3	4	61	638,20
10	03/03/2009	6,3	2	62	618,11
11	31/03/2009	6,2	1	65	651,33
12	05/05/2009	6,1	6	63	639,00
15	01/04/2009	6,2	1	63	566,17
18	29/03/2009	6,2	3	62	646,03
19	24/03/2009	6,3	3	61	618,03
21	17/03/2009	6,3	2	64	634,52
28	04/03/2009	6,3	3	60	612,66
31	27/04/2009	6,2	5	61	631,70
32	27/05/2009	6,1	3	63	615,86
33	20/03/2009	6,3	1	61	690,80
34	14/04/2009	6,2	3	63	609,25
Total Geral	06/04/2009	6,2	41	62	629,01

FONTE: O autor (2015).

Foi empregado os cálculos da média, variância, desvio padrão da média e erro de amostragem com base no processo de amostragem inteiramente casualizado com erro máximo admissível de 10%, aos níveis de probabilidade de 90, 95 e 99%, cujos valores de t bicaudal foram respectivamente: 1,684; 2,021 e 2,704.

2.2 DESCRIÇÃO DOS DADOS PARA COMPARAÇÃO ENTRE O MÉTODO DE ÁREA VARIÁVEL E DE ÁREA FIXA

Para comparar a metodologia de área fixa, com probabilidade proporcional à área (*PPA*) e de área variável, com probabilidade proporcional a área de ocupação média variável dos indivíduos (*PPAV*) foi utilizada uma imagem (Figura 3.1) processada (com ortorretificação e georreferenciamento) de altíssima resolução espacial (25 cm), capturada por meio de Veículo Aéreo não Tripulado (VANT), modelo *SenseFly eBee*, em um talhões de *Eucalyptus dunnii* Maiden contíguo a área de estudo, com idade de 6.2 anos.

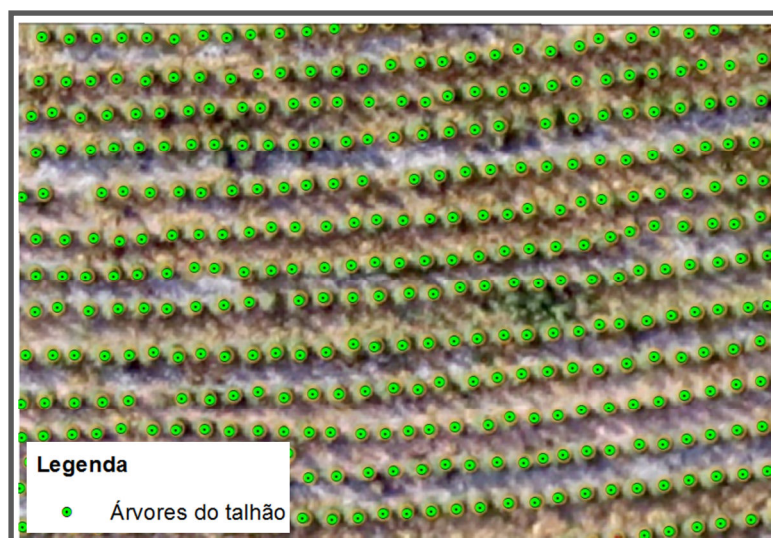


FIGURA 3.1– DETALHE DA IMAGEM DE ALTA RESOLUÇÃO ESPECTRAL E ATRIBUIÇÃO DE PONTOS POR COPA SOB UM PLANTIO DE *Eucalyptus dunnii* Maiden EM TRÊS BARRAS, SC. FONTE: O AUTOR (2015).

A contagem total dos indivíduos (censo) foi realizado manualmente com apoio do software *ArcGis* 10.2.2, onde cada árvore viva restituída recebeu sobre sua copa um atributo de ponto e uma coordenada plana (*UTM – Universal Transversa de Mercator*), permitindo a formatação de um *shapefile* específico contendo todas as árvores do talhão avaliado (Figura 3.2).

A distribuição dos indivíduos no talhão possui um espaçamento inicial 4,5 metros na entre linha e 3 metros na linha de plantio. Todavia, foram detectadas variações nessas distâncias de ± 20 cm, abrangendo, portanto, os limites de 4,30m < entre linha < 4,70m e 2,80m < linha < 3,20m. Tais variações são decorrentes da declividade, da regulagem dos implementos de plantio, dado à mecanização da

atividade, os desvios de traçado entre as cepas, pois se trata de uma área de reforma de segunda rotação.

Posteriormente, foi efetuado o lançamento inteiramente aleatório de sete UAs de área fixa com 700m² cada e sete UAs de área variável que abrangesse 6 linhas de plantio por 10 plantas na linha (FIGURA 3.3), satisfazendo uma intensidade aproximada de 1 UA por hectare, onde foram contados o número total dos indivíduos dentro das UA's da mesma forma em que foram restituídas as árvores na metodologia de censo, descrita anteriormente.

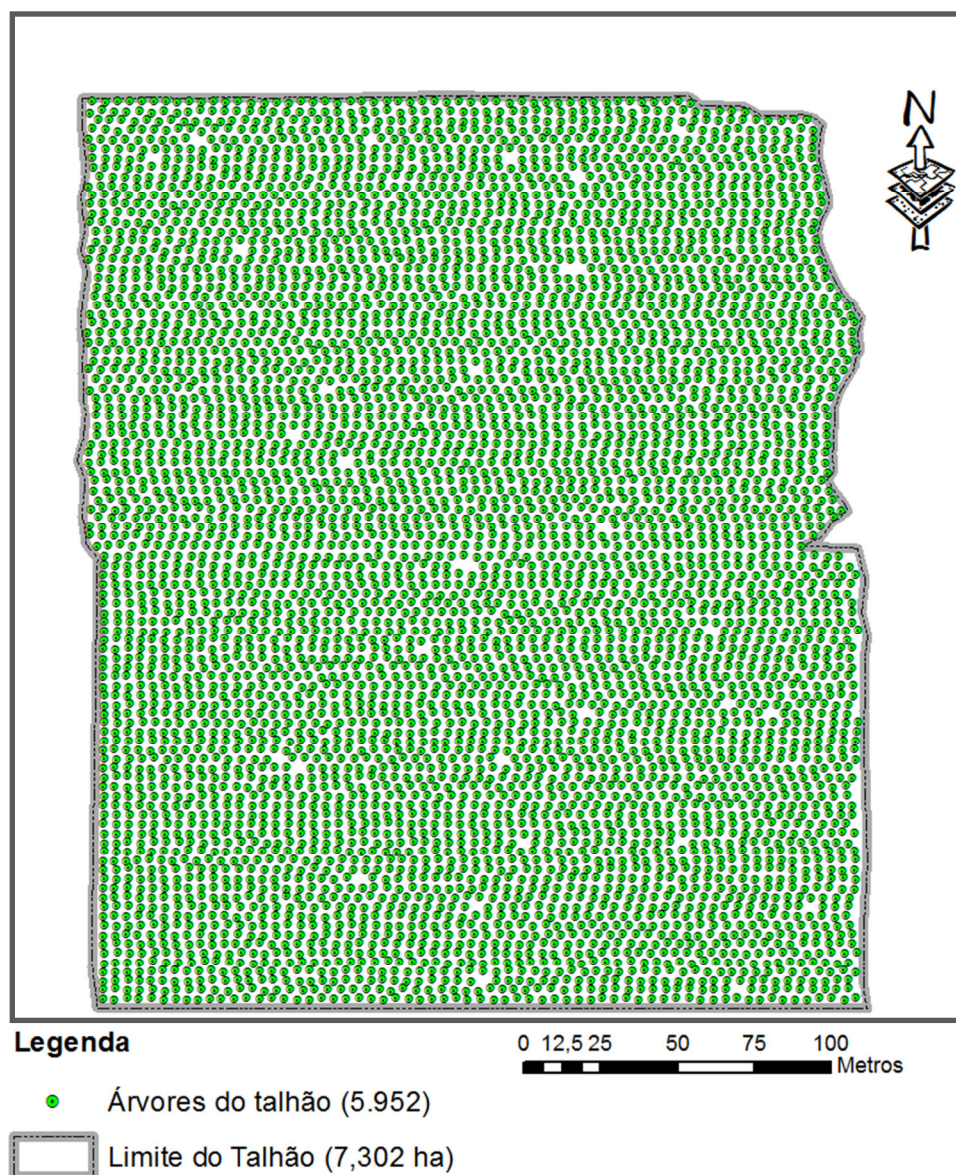


FIGURA 3.2 – DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DAS ÁRVORES IDENTIFICADAS NA IMAGEM DE ALTA RESOLUÇÃO ESPECTRAL EM POVOAMENTO DE *Eucalyptus dunnii* Maiden EM TRÊS BARRAS, SC.

FONTE: O AUTOR (2015).

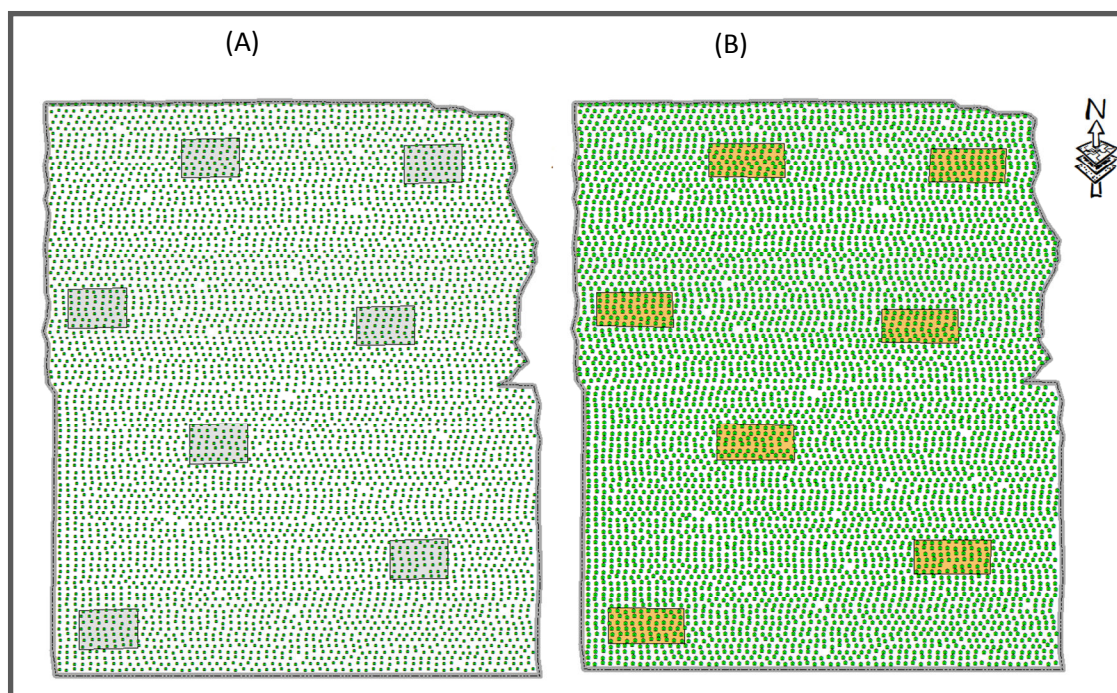


FIGURA 3.3 – DISTRIBUIÇÃO ALEATÓRIA DE 7 UA DE ÁREA FIXA (A) E 7 UA DE ÁREA VARIÁVEL (B) EM POVOAMENTO DE *Eucalyptus dunnii* Maiden EM TRÊS BARRAS, SC.
 FONTE: O AUTOR (2015).

2.3 DESENVOLVIMENTO TEÓRICO DO MÉTODO DE ÁREA VARIÁVEL

Esta proposta surge após muitas reflexões e avaliações sobre os métodos amostrais já conhecidos na literatura, principalmente o Método de Área Fixa. Nas inúmeras aplicações práticas em inventários florestais detectou-se que esse método apresenta condições de ordem prática indesejáveis, conforme acima mencionadas, principalmente a ocorrência de árvores marginais e a delimitação incorreta da área de abrangência média (m^2) de cada indivíduo na população.

2.3.1 Critério Probabilístico de Seleção das Árvores

O critério probabilístico de seleção das árvores que comporão a unidade amostral se deu com probabilidade proporcional à área média de ocupação dos indivíduos de uma UA.

Para se assegurar igual probabilidade de seleção das árvores em povoamento florestal, procede-se como segue:

- a) Cada UA é aleatoriamente escolhida, tal que seu canto esquerdo é identificado em uma linha de plantio e nela as próximas dez árvores subsequentes na linha. Da mesma maneira outras dez árvores serão tomadas na sexta linha escolhida à direita da precedente. Depois de fechada a UA nos limites das linhas intermediárias, ou seja, na 2ª até a 5ª, de tal modo a não existir árvores marginais;
- b) As distâncias entre e ao longo das linhas resultantes do ajuste final serão medidas e formarão um retângulo, cujo produto de seus lados resultará na área variável da UA, ou seja, A_i ;
- c) Depois de fechado os limites da UA, será efetuada a contagem das árvores ocorrentes na 2ª até a 5ª linhas, para obter o número também variável de indivíduos na UA, ou seja, n_i . Se em A_i foram estabelecidas C_i covas de plantio, então $n_i \leq C_i$;
- d) Como se pode depreender, em cada UA a seleção das árvores fica condicionada a uma área média a_i , associada à condição individual X_i , tal que se possa estabelecer a probabilidade de sua ocorrência, que é obtida pelas relações (1) e (2).

$$a_i = \frac{A_i}{n_i} \quad (1)$$

$$p_i = \frac{a_i}{A} \quad (2)$$

Em que A é a área da população amostrada.

Se A for considerada como a área de 1 ha, então o inverso dessa probabilidade de ocorrência será o estimador do número de árvores por ha em cada UA_i , ou seja,

$$\frac{1}{p_i} = p^{-1} = \frac{A}{a_i} = \frac{An_i}{A_i} = N_i \text{ ha}^{-1} \quad (3)$$

Observa-se que esse estimador é variável por parcela, configurando-se tipicamente um método de amostragem com probabilidade proporcional a um tamanho (ppt), que no presente caso é a grandeza a_i .

Nesse procedimento amostral na área A ocorre uma condição dicotômica, ou seja, a UA é representada pela área média a_i , à qual as n_i árvores que a integram ocorrem com igual probabilidade e tal conjunto será considerado igual a um em caso de sucesso e os demais conjuntos de árvores da floresta que não se qualificam serão considerados iguais a zero, ou seja, insucesso. Aplicando-se nessas condições a Distribuição Probabilística de Bernoulli, poder-se-á obter a expectativa matemática para o total N conjuntos de árvores por hectare $E\left(\sum_{i=1}^N X_i\right)$, ou seja,

$$E\left(\sum_{i=1}^N X_i\right) = \sum_{i=1}^{N-1} [(X_i = 0) p^{-1}] + \sum_{i=1}^1 [(X_i = 1) p^{-1}] = \sum_{i=1}^1 p^{-1} = \sum_{i=1}^1 \frac{An_i}{A_i} = \frac{10.000 n_i}{A_i}$$

Então:

$$N_i \text{ ha}^{-1} = 10.000 n_i A_i^{-1} \quad (4)$$

Considera-se que, para obter os estimadores complementares de área basal e de volume por hectare, as expectativas matemáticas se processam de forma similar.

A expectativa matemática da área basal será obtida pela somatória de todos os possíveis conjuntos de n_i árvores, das quais se toma suas áreas transversais, ou seja,

$$\left(\sum_{i=1}^{n_i} g_i\right) n_i^{-1} = \bar{g}_i \quad (5)$$

Se tomada no total da área florestal $E\left(\sum_{i=1}^N \bar{g}_i X_i\right)$ será obtida como segue:

$$\begin{aligned}
E\left(\sum_{i=1}^N \bar{g}_i X_i\right) &= \sum_{i=1}^{N-1} [\bar{g}_i (X_i = 0) p^{-1}] + \sum_{i=1}^1 [\bar{g}_i (X_i = 1) p^{-1}] \\
E\left(\sum_{i=1}^N \bar{g}_i X_i\right) &= \sum_{i=1}^1 \bar{g}_i p^{-1} = \bar{g}_i p^{-1} = \bar{g}_i \frac{A n_i}{A_i} = \frac{10.000 \bar{g}_i n_i}{A_i} \\
\hat{G}_i &= 10.000 \bar{g}_i n_i A_i^{-1}
\end{aligned} \tag{6}$$

A expectativa matemática do volume será obtida pela somatória de todos os possíveis conjuntos de n_i árvores, das quais se toma seus volumes individuais, ou seja,

$$\left(\sum_{i=1}^{n_i} v_i\right) n_i^{-1} = \bar{v}_i \tag{7}$$

A expectativa matemática do volume $E\left(\sum_{i=1}^N \bar{v}_i X_i\right)$ será obtida como segue:

$$\begin{aligned}
E\left(\sum_{i=1}^N \bar{v}_i X_i\right) &= \sum_{i=1}^{N-1} [\bar{v}_i (X_i = 0) p^{-1}] + \sum_{i=1}^1 [\bar{v}_i (X_i = 1) p^{-1}] \\
E\left(\sum_{i=1}^N \bar{v}_i X_i\right) &= \sum_{i=1}^1 \bar{v}_i p^{-1} = \bar{v}_i p^{-1} = \frac{A \bar{v}_i n_i}{A_i} = \frac{10.000 \bar{v}_i n_i}{A_i} \\
V_i \text{ ha}^{-1} &= 10.000 \bar{v}_i n_i A_i^{-1}
\end{aligned} \tag{8}$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 RESULTADOS DA APROPRIAÇÃO DO MÉTODO DE ÁREA VARIÁVEL

O método de amostragem PPAV foi aplicado aos dados de 41 UAs e os resultados apresentados na (TABELA 3.2).

TABELA 3.2 – RESULTADOS DOS ESTIMADORES BÁSICOS OBTIDOS EM 41 PARCELAS DE *Eucalyptus dunnii*. Maiden EM TRÊS BARRAS, SC.

Talhão Nº	Unidade Amostral - UA Nº	Nº de covas na UA	Nº de árvores medidas na UA - n_i	Área da UA A_i m^2	Área média por árvore – $a_i = A_i/n_i$ m^2	$\sum_{i=1}^{n_i} g_i$ m^2	$\sum_{i=1}^{n_i} v_i$ m^3
3	1	61	59	658,5	11,2	1,505	19,312
3	2	62	57	584,0	10,2	1,272	13,929
8	3	60	60	634,8	10,6	1,552	21,044
8	4	60	60	651,2	10,9	1,548	21,196
8	5	61	59	607,4	10,3	1,261	16,596
10	6	65	60	637,7	10,6	1,415	17,062
10	7	58	57	598,5	10,5	1,244	15,306
2	8	65	49	598,5	12,2	1,167	13,422
8	9	62	60	659,4	11,0	1,349	15,693
2	10	62	60	684,0	11,4	1,242	12,059
19	11	58	53	597,2	11,3	1,347	15,451
11	12	65	56	651,3	11,6	1,262	13,276
19	13	63	55	621,1	11,3	1,513	20,524
19	14	63	52	635,8	12,2	1,244	14,652
12	15	64	59	670,2	11,4	1,266	14,342
12	16	62	62	648,8	10,5	1,623	20,404
12	17	64	61	650,5	10,7	1,151	12,076
18	18	60	58	640,9	11,0	1,321	14,225
12	19	62	61	613,8	10,1	1,493	18,387
12	20	60	49	602,0	12,3	1,109	11,125
12	21	64	52	648,8	12,5	1,182	12,826
18	22	61	56	630,7	11,3	1,304	13,881
18	23	64	57	666,6	11,7	1,269	12,696
34	24	63	62	602,0	9,7	1,462	19,009
34	25	63	43	623,2	14,5	1,077	13,622
34	26	64	60	602,6	10,0	1,584	20,742
15	27	63	61	566,2	9,3	1,243	14,807
33	28	61	53	690,8	13,0	1,476	18,785
31	29	61	60	591,5	9,9	1,345	16,603
32	30	61	55	632,3	11,5	1,316	17,417
32	31	63	56	611,1	10,9	1,176	12,866
21	32	64	53	639,9	12,1	1,388	18,941
31	33	62	61	612,9	10,0	1,236	15,065
31	34	62	60	648,2	10,8	1,478	18,341
32	35	64	30	604,2	20,1	0,687	8,000

continua

							conclusão
21	36	64	60	629,1	10,5	1,480	19,866
28	37	60	59	678,2	11,5	1,150	11,101
31	38	59	57	633,4	11,1	1,371	15,958
31	39	63	62	672,4	10,8	1,446	16,790
28	40	60	58	555,8	9,6	1,105	11,244
28	41	61	61	603,9	9,9	1,146	10,845

FONTE: O autor (2015).

Na tabela 3.2 nota-se que mesmo tratando de um povoamento provindo da mesma unidade anual de produção, técnicas silviculturais e espaçamento inicial de plantio padrão (3,5x3,0), há uma variabilidade alta em função da área média das unidades amostrais, variando entre 555,84 a 690,80m². Fica também, evidenciado, que há uma variação da densidade inicial de plantio, permitindo inclusive, gerar inferências sobre a consistência silvicultural de implantação, característica a qual não ficaria explicitamente evidenciada no método de amostragem de área fixa.

Os estimadores da amostragem PPAV estão apresentados na TABELA 3.3.

TABELA 3.3 – RESULTADOS DA APLICAÇÃO DO MÉTODO DE AMOSTRAGEM PPAV EM 41 PARCELAS DE *Eucalyptus dunnii* Maiden EM TRÊS BARRAS, SC.

Talhão Nº	UA _i Nº	\bar{g}_i	\bar{v}_i	$N_i ha^{-1}$	\hat{G}_i	$V_i ha^{-1}$
3	1	0,0255	0,3273	896	22,85	293,266
3	2	0,0223	0,2444	976	21,78	238,509
3	3	0,0259	0,3507	945	24,45	331,521
8	4	0,0258	0,3533	921	23,76	325,482
8	5	0,0214	0,2813	971	20,75	273,220
8	6	0,0236	0,2844	941	22,20	267,552
10	7	0,0218	0,2685	952	20,79	255,738
10	8	0,0238	0,2739	819	19,50	224,269
10	9	0,0225	0,2616	910	20,46	237,999
2	10	0,0207	0,2010	877	18,16	176,316
8	11	0,0254	0,2915	887	22,56	258,708
2	12	0,0225	0,2371	860	19,37	203,833
19	13	0,0275	0,3732	886	24,36	330,460
11	14	0,0239	0,2818	818	19,57	230,443
19	15	0,0215	0,2431	880	18,88	214,001
19	16	0,0262	0,3291	956	25,01	314,508
12	17	0,0189	0,1980	938	17,70	185,661
12	18	0,0228	0,2453	905	20,62	221,960
12	19	0,0245	0,3014	994	24,33	299,549
18	20	0,0226	0,2270	814	18,42	184,796
12	21	0,0227	0,2466	802	18,22	197,692
12	22	0,0233	0,2479	888	20,68	220,110
12	23	0,0223	0,2227	855	19,03	190,465
18	24	0,0236	0,3066	1030	24,28	315,765
18	25	0,0250	0,3168	690	17,28	218,579
34	26	0,0264	0,3457	996	26,29	344,234
34	27	0,0204	0,2427	1077	21,96	261,532

continua

						conclusão
15	28	0,0278	0,3544	767	21,36	271,929
15	29	0,0224	0,2767	1014	22,73	280,701
34	30	0,0239	0,3167	870	20,81	275,449
15	31	0,0210	0,2297	916	19,24	210,537
33	32	0,0262	0,3574	828	21,69	296,001
31	33	0,0203	0,2470	995	20,16	245,799
32	34	0,0246	0,3057	926	22,80	282,939
32	35	0,0229	0,2667	497	11,36	132,411
21	36	0,0247	0,3311	954	23,53	315,768
21	37	0,0195	0,1881	870	16,96	163,667
31	38	0,0241	0,2800	900	21,65	251,928
31	39	0,0233	0,2708	922	21,50	249,706
32	40	0,0191	0,1939	1043	19,89	202,284
21	41	0,0188	0,1778	1010	18,97	179,578
Totais	-	-	-	36.996	855,93	10.174,864
Média		0,0232	0,2756	902	20,88	248,167

FONTE: O autor (2015).

Os estimadores da amostragem resultaram em densidade média de 902 árvores.ha⁻¹, uma área basal média de 20,88m².ha⁻¹ e um volume médio de 248,167m³.ha⁻¹.

A análise estatística pelo processo de amostragem inteiramente casualizado, aplicado às 41 Unidades Amostrais está apresentada na tabela 3.4.

TABELA 3.4 – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS COM APLICAÇÃO DO MÉTODO DE AMOSTRAGEM PPAV EM 41 PARCELAS DE *Eucalyptus dunnii* Maiden EM TRÊS BARRAS, SC.

População	Área (ha)	m ³ .ha ⁻¹	Variância (m ³) ² .(ha ⁻¹) ²	Desvio Padrão m ³ .ha ⁻¹	Erro Padrão Absoluto m ³ .ha ⁻¹	Erro Padrão Relativo %
Média	123,90	248,167	2.716,764	52,123	8,140	-
Mínimo	-	132,411	-	-	-	-
Máximo	-	344,234	-	-	-	-
Probabilidade 90%	-	-	-	-	13,593	5,48%
Probabilidade 95%	-	-	-	-	16,315	6,57%
Probabilidade 99%	-	-	-	-	21,832	8,80%

FONTE: O autor (2015).

Os resultados apresentados na tabela 3.4 revelam que a intensidade amostral de 41 unidades amostrais resultou em um erro padrão relativo inferior ao erro máximo admissível de 10%, cujos valores foram 5,48, 6,57 e 8,80% para as probabilidades de 90, 95 e 99%, respectivamente.

Os intervalos de confiança para o volume em m³.ha⁻¹ e para o total da população, 123,90 hectares, estão apresentados na tabela 3.5, onde também é possível constatar os valores de t tabelado e intensidade amostral requerida para

atender cada nível de probabilidade..

TABELA 3.5 – INTERVALOS DE CONFIANÇA PARA OS ESTIMADORES OBTIDOS COM A AMOSTRAGEM PPAV EM 41 PARCELAS DE *Eucalyptus dunnii* Maiden EM TRÊS BARRAS, SC.

Estimador	Valores de t	Intensidade Amostral Requerida	Intervalos de confiança Para $n = 41$
Média 90%	1,684	12	$234,57 \leq X \leq 261,76$
Média 95%	2,021	18	$231,85 \leq X \leq 264,48$
Média 99%	2,704	32	$226,34 \leq X \leq 270,00$
Total 90%	-	-	$29.063,77 \leq X \leq 32.432,76$
Total 95%	-	-	$28.726,48 \leq X \leq 32.769,40$
Total 99%	-	-	$28.042,97 \leq X \leq 33.452,92$

FONTE: O autor (2015).

3.2 COMPARATIVO ENTRE CENSO, MÉTODO DE ÁREA FIXA E MÉTODO DE ÁREA VARIÁVEL.

Ao todo, 5.952 árvores vivas foram identificadas e contadas no censo sob a imagem de alta resolução. Ainda, a delimitação do polígono do talhão permitiu extrair de forma precisa a área líquida de plantio, assim como a densidade de árvores por hectare e para o total do domínio em estudo (TABELA 3.6). Ademais, com a média do volume (m^3) individual das árvores amostradas nas UA's foi possível estimar o volume por hectare e para o total.

TABELA 3.6 – ÁREA, DENSIDADE E VOLUME OBTIDO PELO CENSO EM POVOAMENTO DE *Eucalyptus dunnii* Maiden EM TRÊS BARRAS, SC.

Nº Árvores (hectare)	Área do talhão (hectare)	Nº Árvores (total)	Volume (m^3 /Árvore)	Volume m^3 (hectare)	Volume total (m^3)
819,5	7,302	5.984	0,325	266,3	1.944,8

FONTE: O autor (2015).

Com a simulação das UA's de área fixa, foram obtidos os resultados apresentados na tabela 3.7, em que um total de 6.433 árvores foi estimado pelo método, que apresentou um volume total para o talhão de 2.090,6 m^3 .

TABELA 3.7 – DENSIDADE E VOLUME OBTIDO COM AS UA's DE ÁREA FIXA EM POVOAMENTOS DE *Eucalyptus dunnii* Maiden EM TRÊS BARRAS, SC.

Covas mensuradas na UA	Área UA (m²)	Nº Árvores (ha)	Área do talhão (ha)	Nº Árvores (total)	Volume m³ (hectare)	Volume total (m³)
61	700	866,7	7,302	6.328	281,7	2.056,7
63	700	900,0	7,302	6.572	292,5	2.135,8
64	700	916,7	7,302	6.694	297,9	2.175,4
61	700	883,3	7,302	6.450	287,1	2.096,3
63	700	900,0	7,302	6.572	292,5	2.135,8
62	700	883,3	7,302	6.450	287,1	2.096,3
57	700	816,7	7,302	5.963	265,4	1.938,1
Total	700	881,0	7,302	6.433	286,3	2.090,6

FONTE: O autor (2015).

A simulação realizada com base nas UA's de área variável (PPAV) está apresentada na Tabela 3.8, onde foram estimadas um total de 6.034 árvores e um volume de 1.961,1m³.

TABELA 3.8 – DENSIDADE E VOLUME OBTIDO COM AS UA'S DE ÁREA VARIÁVEL EM POVOAMENTO DE *Eucalyptus dunnii* Maiden EM TRÊS BARRAS, SC.

Covas mensuradas na UA	Área UA (m²)	Nº Árvores (ha)	Área do talhão (ha)	Nº Árvores (total)	Volume m³ (hectare)	Volume total (m³)
60	726,2	826,2	7,302	6.033	268,5	1.960,7
59	739,3	798,1	7,302	5.827	259,4	1.893,9
61	727,4	838,6	7,302	6.123	272,5	1.990,1
60	723,7	829,1	7,302	6.054	269,4	1.967,5
59	711,1	829,7	7,302	6.058	269,7	1.969,0
59	720,2	819,2	7,302	5.982	266,2	1.944,1
60	711,1	843,8	7,302	6.161	274,2	2.002,4
Total	722,7	826,4	7,302	6.034	268,6	1.961,1

FONTE: O autor (2015).

Os resultados comparativos da análise da variância entre o censo, área fixa e PPAV encontram-se apresentados na tabela 3.9.

TABELA 3.9 – DENSIDADE E VOLUME OBTIDO COM AS UA'S DE ÁREA VARIÁVEL EM POVOAMENTO DE *Eucalyptus dunnii* Maiden EM TRÊS BARRAS, SC.

Método	Nº Árvores (ha)	Área do talhão (ha)	Nº Árvores (total)	Volume m³ (hectare)	Volume total (m³)	Diferença (%)
Censo	819,5		5.984	266,3	1.944,8	-
Área fixa	879,6	7,302	6.423**	285,9	2.087,4**	7,3%
PPAV	826,4		6.034 ^{ns}	268,6	1.961,1 ^{ns}	0,8%

* significativo a 95%; ** significativo a 99%;ns: não significativo.

FONTE: O autor (2015).

Os estimadores demonstram alta precisão das estimativas quando a amostragem de área variável (PPAV) é utilizada para obter a densidade e volume total do talhão avaliado, não apresentando diferenças significativas aos níveis de 95 e 99% de probabilidade. A amostragem de área fixa apresenta tendenciosidade de superestimar em 7,3% a densidade e volume total do talhão avaliado, apresentando um resultado significativamente diferente ao obtido com o censo, ao nível de 99% de probabilidade.

A característica que mais exerce influência nas estimativas é a área de ocupação média (m^2) dos indivíduos na população, quando a amostragem com área variável consegue identificar variações de espaçamento pontualmente em cada UA, e dessa forma gerar estimadores mais consistentes do povoamento.

4. CONCLUSÕES

Considerando a apropriação da estrutura teórica do método de amostragem PPAV e comprovação experimental de sua eficácia para aplicação em inventários florestais contínuos de povoamentos florestais conclui-se:

A metodologia com seleção de árvores proporcionais a uma área variável - PPAV, permite mitigar significativamente o problema de árvores marginais nas unidades amostrais, corrige os possíveis erros sistemáticos de espaçamento e facilita operacionalmente a implantação e remedição das UAs;

Como as unidades de área variável não contém árvores marginais elas proporcionam melhor estabilidade para obtenção dos estimadores no IFC, como representatividade e estabilidade das distribuições: diamétrica, hipsométrica e volumétrica, bem como o controle de mortalidade, entre outros;

A estrutura amostral permite uniformidade, ou fixação da mesma UA em diferentes tipos de espaçamento, assegurando que os estimadores se compensem nas diversidades de espaçamentos;

Essa estrutura amostral garante um mínimo representativo de indivíduos na UA para gerar os seus estimadores com precisão e consistência estatística;

A característica que mais exerce influência nas estimativas da amostragem PPAV é a área de ocupação média (m^2) dos indivíduos na população, que consegue identificar variações de espaçamento pontualmente em cada UA, e dessa forma gera estimadores mais consistentes do povoamento.

5. RECOMENDAÇÕES

O método de área variável já é uma realidade em diversas empresas florestais do Brasil, entre elas a Eco Brasil Florestas no Tocantins, grupos de investimento no Maranhão e F Comp. Compensados S.A. em Três Barras, SC, no entanto sem a devida apropriação teórica e matemática de seus estimadores. Recomenda-se, portanto, o presente estudo para melhor apropriação conceitual dos seus trabalhos.

Dado as possíveis variabilidades de espaçamentos existentes nas empresas florestais, sejam essas ocasionadas por declividade, tipos de solo, equipamentos e outras práticas silviculturais que exerçam influência na área média de abrangência de cada indivíduo na população, recomenda-se o uso do método de amostragem de área variável para gerar estimadores mais eficientes e precisos das áreas inventariadas.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABREU, E. C. R., SCOLFORO, J. R. S., OLIVEIRA, A. D., MELLO, J. M., KANEGAE JR, H. Modelagem para prognose precoce do volume por classe diamétrica para *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, n. 61. p. 86-102., 2002.

BITTERLICH, W. Die Winkelzählprobe. **Allg. Forst-u. Holzwirtschaft**. Ztg., 59 (1/2): 4-5, 1948.

COTTAM, G. e CURTIS, J. T. The use of Distance Measures in Phytosociological Sampling. **Ecology**, v.37, n.3. 1956, p. 451-460, 1956.

MARTINS, R. M., SANTANA LEITE, M. V., CABACINHA, C. D., ASSIS, A. L. Teste de identidade de modelos volumétricos para povoamentos de *Eucalyptus sp.* em sete municípios de Minas Gerais. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.11 n.21; p. 1818-1833., 2015.

PÉLLICO NETTO, S e BRENA, D. A. **Inventário Florestal**. Ed. pelos autores. Curitiba, 316 p., 1997.

PRODAN, M. Holzmesslehre. Frankfurt, J. D. **Sauerländer's Verlag**,. 644 p., 1965.

RIBEIRO, A., FERRAZ FILHO, A. C., MELLO, J. M., FERREIRA, M. Z., LISBOA, P. M. M., SCOLFORO, J. R. S. Estratégia e metodologias de ajuste de modelos hipsométricos em plantios de *Eucalyptus sp.* **Cerne**, Lavras, v. 16, n. 1, p. 22-31., 2010.

STRAND, L. Sampling for volume along a line. **Meddelelser fra Det norske Skogforsoksvesen**, (51): 327-331, 1958.

CAPÍTULO III

APRESENTAÇÃO CONCEITUAL DO PROCESSO DE AMOSTRAGEM EM RODÍZIO PARA POVOAMENTOS DE *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi apresentar conceitualmente o Processo de Amostragem em Rodízio - AR para inventários florestais contínuos em povoamentos. Dados de 845 unidades amostrais (*UA*) de área variável (*PPVA*), mensurados nas intensidades amostrais de 1:2,5ha, 1:5ha e 1:10ha, proveniente de um inventário florestal contínuo, foram mensurados entre os anos de 2011 e 2014 em 2.110.68 hectares, dividido em 3 unidades anuais de Produção- *UAP*, com idades iniciais em 2011 de 2,5, 3,5 e 4,5 anos. A análise estatística da amostragem foi realizada de forma estratificada por *UAP* e classe de sítio, identificada no capítulo I. Por fim, o modelo de Clutter (1963) foi ajustado para gerar a prognose da produção na idade de referência de 7 anos, com base nas diferentes intensidades amostrais e identificar o impacto que essas geram nos estimadores de predição do volume a nível de povoamento. Foi constatado que o AR é eficiente para estimar com precisão os estimadores em nível de *UAP* e classe de sítio em todas as intensidades amostrais. Com as estatísticas amostrais foi possível constatar que o rodízio além de propiciar a concentração da amostragem em talhões, poderá também reduzir substancialmente os custos dos inventários florestais, em até 50% o número de *UA* mensuradas em cada *UAP* sem perder precisão dos estimadores. A partir dessa experiência é possível dispensar totalmente a realização de inventários pré-corte nas empresas florestais.

Palavras-chave: Rodízio de parcelas, intensidade amostral, amostragem estratificada.

CHAPTER III

PRESENTATION CONCEPT OF TRUNDLE SAMPLING FOR STANDS OF *Eucalyptus sp.* IN TROPICAL REGION OF BRAZIL

ABSTRACT

The objective of this study was conceptually present the Trundle Sampling (TS) for continuous forest inventories in stands. A total of 845 sampling units (SU) of variable area (PPVA), measured with sample intensities of 1: 2,5 ha, 1:5 ha and 1:10 ha, from a continuous forest inventory (CFI), were measured between the years 2011 and 2014, with a total area of 2,110.68 hectares, split into 3 Annual Production Units (APU), with initial ages from 2011 of 2.5, 3.5 and 4.5 years old. Statistical analysis of samples was conducted in a stratified manner by APU and site class identified in Chapter I. Finally, Clutter model (1963) was used to generate the growth and yield at age of 7 years, based in different sample intensities and identify the impact they exercise on prediction of volume estimators in the population. It was found that TS is efficient to estimate accurately the estimator's level of APU and site class in all sample intensities. Evaluating the sample statistics it was found that the trundle besides providing sampling concentration in the compartments, can also substantially reduce the costs of forest inventories, up to 50% the number of SU measured at each APU without losing accuracy of the estimators. From this experience it is possible to completely dispense the implementation of pre-cutting forest inventories in forest companies.

Keywords: Trundle plots, sampling intensity, stratified sampling.

1. INTRODUÇÃO

Os inventários florestais contínuos são instrumentos técnicos imprescindíveis para substanciar informações cruciais demandadas diariamente na atividade técnica das empresas florestais. Elas englobam grande espectro de avaliações concernentes ao caráter dinâmico da população florestal.

O IFC constitui, portanto, uma atividade permanente em todo o ciclo produtivo da floresta, devido à necessidade de monitoramento de crescimento da produção florestal, da evolução do estoque, da mortalidade de plântulas e suas consequências na densidade, da qualidade dos sítios para a produção, entre outros.

Bickford (1963) especificou com muita clareza que o IFC é um instrumento fundamental para o planejamento das operações de exploração florestal, para se efetuar transações de compra e venda de madeira, para a localização de estradas ligando as unidades de plantio e para efetivação de tantas outras atividades concernentes ao manejo da unidade produtiva e conclui afirmando que o IFC é a base para a utilização racional dos recursos florestais e para orientar o manejador em suas inúmeras decisões.

A estrutura técnica para implantação e condução do IFC pressupõe conhecimentos especializados da teoria de amostragem, pois essa constitui a espinha dorsal desse trabalho. Os suíços introduziram em 1890 o Processo de Amostragem com Repetição Total de parcelas – ART, conhecido mais comumente como Parcelas Permanentes, visando à avaliação do crescimento volumétrico por unidade de área, bem como o crescimento e mudanças em nível individual das árvores (SCHIMID, 1971).

A maioria das empresas, senão sua totalidade aceitou plenamente implantar essa metodologia nos seus IFC's aqui no Brasil, porém ao longo das últimas décadas não têm incorporado as inovações que surgiram para o aprimoramento desse processo amostral.

Os novos enfoques surgiram da percepção de que a precisão dos estimadores amostrais poderá ser melhorada, sem aumentar custos na amostragem. As novas concepções metodológicas consideram aspectos relevantes na tratativa das populações florestais, principalmente no que concerne aos níveis de estratificação. Até o momento as empresas estratificam as populações florestais por

espécie e por idade e tratam uma unidade anual de plantio – UAP como sendo a subpopulação básica para a distribuição das parcelas permanentes.

A alocação das parcelas permanentes dentro da UAP pressupõe atingir uma densidade amostral compatível com a disponibilidade financeira da empresa.

Trabalhos recentes mostram que, quando talhões dentro de uma UAP não são considerados como estágio amostral para alocação das parcelas permanentes, tal decisão gera perda de eficiência na obtenção dos estimadores de precisão. Tal avanço conceitual pressupõe complicações metodológicas, pelo fato de os talhões apresentarem tamanhos diferentes, o que implicará em ajustar a amostragem com proporcionalidade a uma grandeza identificada como a mais apropriada para gerar aumento de precisão nos estimadores da amostragem.

Ainda, Ignácio (2001) considerou, para efeito de aprimoramento dos estimadores de precisão, que a intensidade das parcelas dentro dos talhões fosse efetuada com probabilidade proporcional ao volume delas, o que resultou em expressiva redução dos erros amostrais.

Mais recentemente Péllico Netto (2014) demonstrou que se o processo de estratificação for detalhado em nível de sítio e a amostragem distribuída com proporcionalidade às suas respectivas áreas, então os estimadores efetuados por sítio podem reduzir a variância estratificada em até nove vezes em relação a uma amostragem aleatória efetuada na UAP, conseqüentemente o mapeamento de sítio nas empresas se torna um requisito fundamental para o aumento da precisão dos estimadores do IFC.

Por fim, com a aplicação do Processo de Amostragem em Rodízio – PAR proposto por Péllico Netto (1979), pode-se tornar o IFC nas empresas com máxima eficiência, porque a concentração da mesma amostragem efetuada normalmente em cada ocasião será, na implantação dessa nova metodologia, alocada na metade dos talhões, proporcionando, dessa maneira, aumento substantivo de precisão em nível dos talhões sem qualquer aumento de custos na execução do IFC e dispensando plenamente a instalação de inventários pré-cortes.

A implantação dessas inovações nos IFC's das empresas permitirá assegurar qualidade informativa muito superior que a atualmente conseguida e viabilizará o aprimoramento do planejamento da produção e da execução das atividades de manejo dos povoamentos.

1.1 OBJETIVO GERAL

Apresentar a concepção teórica e de aplicação do Processo de Amostragem em Rodízio – PAR para povoamentos clonais de *Eucalyptus* sp em região tropical do Brasil.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar os níveis da estratificação;
- Apresentar os parâmetros para a população estratificada;
- Apresentar os estimadores para os diversos níveis de estratificação;
- Calcular os volumes do povoamento com base na semelhança de sítio e idade da UAP.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 CONCEPÇÃO TEÓRICA DO PROCESSO DE AMOSTRAGEM EM RODÍZIO PARA POVOAMENTOS.

A concepção teórica para este processo de amostragem pressupõe a prévia estratificação administrativa da área de produção total da empresa. O primeiro nível será separar os plantios por espécie. O segundo nível será a separação dos povoamentos de uma determinada espécie por idade. Dessa maneira o estrato administrativo padrão será a área de um ano de plantio de uma determinada espécie, que poderá ser denominado Unidade Anual de Plantio – *UAP*.

Essa *UAP* é normalmente composta por M unidades amostrais potenciais – *UA*. A área total da *UAP* é obtida por processo topográfico ou outro processo de mapeamento, denominada de A_{UAPr} , em que $r = 1, 2, 3 \dots L$, em que L será o número total de *UAPs* existente na propriedade com aquela espécie.

No presente processo de amostragem um novo nível de estratificação será introduzido, em que a *UAP* será subdividida em subpopulações correspondentes às áreas dos sítios delimitados dentro da A_{UAPi} . Sejam esses estratos denominados S_j , tal que $j = I, II \dots K$, em que K é o número de unidades de sítio dentro de cada *UAP*. Dada a divisão de S_j , onde $j=2$, a demarcação dos limites dos sítios será efetuada considerando-se as alturas dominantes de cada unidade amostral, devidamente avaliada nos intervalos das curvas de sítio, projetadas para uma idade de referência, tal que para o sítio S_{II} as alturas dominantes se localizam no intervalo $I_0 \leq h_{dom} \leq I_1$ e no sítio S_I no intervalo $I_1 \leq h_{dom} \leq I_2$. Tais limites serão demarcados usando-se a aplicação de métodos geoestatísticos. Completada as delimitações dos sítios a suas áreas serão devidamente avaliadas e expressas por A_{SI} , A_{SII} , para os sítios I, e II respectivamente, consequentemente $A_{SI} + A_{SII} = A_{UAP}$. Denominando-se de W_{Sj} os respectivos pesos participativos dos sítios na *UAP*, tem-se que $W_I = M_I M^{-1}$, $W_{II} = M_{II} M^{-1}$ e assim sucessivamente, consequentemente $W_I + W_{II} = 1$.

Utilizando-se os valores das variáveis medidas em cada UA e os aplicando em uma função volumétrica desenvolvida especificamente para esse povoamento, obtêm-se o volume por UA, que será representado pela variável X_i , tal que $i = 1, 2$,

3..... M . Após a delimitação dos sítios, as UAs serão identificadas dentro de cada um deles, ou seja, X_{ij} . Dessa maneira, a UA expressa por X_{3II} representa o volume da terceira parcela dentro do sítio II. Assim, a população amostral total estará representada por $P(X_{1I}, X_{2I}, X_{3I}, \dots, X_{MI} ; X_{1II}, X_{2II}, X_{3II}, \dots, X_{MII}, \dots, X_{1IV}, X_{2IV}, X_{3IV}, \dots, X_{MIV})$, devidamente distribuída nos diferentes sítios. Dessa maneira o número total de UAs estará composto por $M_I + M_{II} = M$, cujas médias aritméticas e variâncias por sítio são dadas por \bar{X}_j e S_j^2 respectivamente, conforme está apresentado em (1) e (2).

$$\bar{X}_j = \sum_{i=1}^{m_j} X_{ij} \cdot M_j^{-1} \quad (1)$$

$$S_j^2 = \sum_{i=1}^{M_j} (X_{ij} - \bar{X}_j)^2 (M_j - 1)^{-1} \quad (2)$$

Os parâmetros para a população estratificada serão obtidos conforme estão expressos em (3) para a média estratificada e em (4) para a variância estratificada.

$$\bar{X}_{est(S)} = \sum_{j=1}^K W_j \bar{X}_j \quad \text{em que} \quad W_j = M_j M^{-1} \quad (3)$$

$$S_{est(S)}^2 = \sum_{h=1}^L W_j^2 S_j^2 \quad (4)$$

Considerando-se a seguir a amostragem dentro de cada UAP, normalmente amostrada anualmente para realização do Inventário Florestal Contínuo – IFC, dentro da qual são alocadas m unidades amostrais – UA aleatória ou sistematicamente distribuídas. Tais UA's ao serem medidas anualmente são tomadas medições de todos seus diâmetros, de parte de suas alturas, inclusas as dominantes – h_{dom} . As alturas das árvores não medidas serão obtidas usando-se uma função hipsométrica desenvolvida especificamente para este povoamento.

Tomando-se os estratos já previamente definidos, tem-se que cada sítio terá m_j UA, que lá estarão alocadas proporcionais às respectivas áreas dos sítios, ou seja, $m_j \approx W_j$. A amostragem total efetuada dentro da UAP será igual a soma das unidades distribuídas nos diferentes sítios, ou seja, $m_I + m_{II} + m_{III} + \dots m_K$ ou

$\sum_{j=1}^K m_j = m$. Tomando-se os volumes das unidades amostradas por sítio pode-se calcular os estimadores respectivos das médias aritméticas e variâncias por sítio, ou seja, \bar{x}_j e s_j^2 , conforme estão apresentadas em (5) e (6).

$$\bar{x}_j = \sum_{i=1}^{m_j} X_{ij} \cdot m_j^{-1} \quad (5)$$

$$s_j^2 = \sum_{i=1}^{m_j} (X_{ij} - \bar{x}_j)^2 (m_j - 1)^{-1} \quad (6)$$

Tais estimadores para a população estratificada serão obtidos conforme estão expressos em (7) para a média estratificada e em (8) para a variância estratificada.

$$\bar{x}_{est(s)} = \sum_{j=1}^K W_j \bar{x}_j \quad \text{em que } W_j = M_j M^{-1} \quad (7)$$

$$s_{est(s)}^2 = \sum_{h=1}^L W_j^2 s_j^2 \quad (8)$$

Para introduzir a concepção da amostragem em rodízio, conforme proposta por Péllico Netto (1979) considere que a intensidade amostral m alocada na *UAP* seja amostrada anualmente concentrada em 1/2 dos talhões, ou seja, não será aumentado o número de *UAs* medidas anualmente e nem o custo do IFC da empresa. Dessa maneira denominando-se os talhões dentro da *UAP* como T_u , tal que $u = 1, 2, 3, \dots, Z$, ou seja, Z é o número total de talhões dentro da *UAP*. Como as *UAs* estarão concentradas dentro dos talhões e conseqüentemente dentro dos sítios que os integram, então as *UAs* serão indexadas para representá-los como m_{iuj} . Dessa maneira a *UA* $m_{2;4;II}$ será a segunda *UA* dentro do quarto talhão e dentro do sítio II. Da mesma maneira, o volume associado a essa *UA* será identificado por X_{iuj} e particularizando-o como no caso acima se tem $X_{2;4;II}$.

Ainda, cabe salientar que tais estimadores serão obtidos para cada ocasião em que se efetua o IFC, que no presente processo de amostragem completa o rodízio após a realização da terceira ocasião, quando os talhões amostrados na

primeira ocasião voltarão a ser remedidos. Definindo-se que o rodízio será efetuado em 1/2 dos talhões, então os estimadores serão indexados para se poder identificá-los em qual ocasião formam obtidos, ou seja, $o = 1, 2, 3, \dots$. O, em que O é o número de ocasiões considerado no rodízio.

Dessa maneira, se a UA genérica for identificada como m_{iujO} o volume a ela associado o será como X_{iujO} . Se a unidade referida acima foi medida na primeira ocasião será identificada como $m_{2;4;II;1}$ e o volume a ela associado como $X_{2;4;II;1}$.

Além dos estimadores obtidos anualmente na UAP por sítio, as empresas poderão extrair informações de estimadores totais para o nível de compartimento (agrupamento de talhões semelhantes dentro da UAP) ou propriamente para os talhões, quando o inventário se destina a alguma análise específica ou inventário pré-corte. Dessa maneira será necessário se ter as áreas dos compartimentos, que serão identificadas por A_{Cu} , então $A_{C1} + A_{C2} + A_{C3} \dots + A_{CZ} = A_{UAP}$ ou para as áreas dos talhões como A_{Tu} , portanto $A_{T1} + A_{T2} + A_{T3} \dots + A_{TZ} = A_{UAP}$.

No presente trabalho, serão apresentados os estimadores em nível de UAP e classe de sítio, dado sua finalidade e objetivos propostos.

Considerando-se a identificação dos estimadores para todas as especificidades apresentadas anteriormente se tem:

$$\bar{x}_{ujo} = \sum_{i=1}^{m_{ujo}} X_{iujO} \cdot m_{ujo}^{-1} \quad (9)$$

$$s_{ujo}^2 = \sum_{i=1}^{m_{ujo}} (X_{iujO} - \bar{x}_{ujo})^2 (m_{ujo} - 1)^{-1} \quad (10)$$

Como tais estimadores são obtidos por sítio dentro de cada talhão, então o seu volume poderá ser facilmente obtido tomando-se primeiramente a média ponderada dos volumes dentro dos talhões e após multiplicá-la pela área do talhão.

Tal estimador será obtido como está especificado em (11).

$$\bar{x}_{ujo} = \sum_{j=1}^K W_{ujo} \bar{x}_{ujo} \quad \text{em que} \quad W_{ujo} = M_{ujo} M_{uo}^{-1} \quad (11)$$

O volume do talhão será obtido conforme está especificado em (12).

$$V_{Tu} = \bar{x}_{ujo} A_{Tu} \quad (12)$$

Observa-se que \bar{x}_{ujo} poderá ser obtido genericamente por sítio, ou seja, conforme foi definido em (5), entretanto se ele for obtido por ocasião, conforme está especificado em (13), então todos os talhões poderão ter estimativas volumétricas em todas as ocasiões, bastando, para tanto, ter as respectivas áreas dos sítios em cada um deles para se aplicar a devida ponderação ao valor médio do sítio obtido em cada ocasião. Genericamente se tem os estimadores conforme está apresentado em (13).

$$V_{Tu} = \bar{x}_{jo} A_{Tu} \quad (13)$$

Finalmente, se o IFC está sendo conduzido em todas as UAPs da propriedade, então poder-se-á processar os cálculos da Amostragem em Rodízio em todas elas e os estimadores finais para toda a propriedade será o resultado da aplicação do Processo de Amostragem Estratificada (PÉLLICO NETTO e BRENA, 1997), em que se pressupõe conhecer suas respectivas áreas, ou seja, A_{UAPr} e os respectivos pesos $W_r = M_r M^{-1}$.

2.2 DADOS PARA APLICAÇÃO DO PROCESSO DE AMOSTRAGEM EM RODÍZIO PARA POVOAMENTOS.

Para efetuar a aplicação do processo de amostragem em rodízio, foram utilizados dados de povoamentos de *Eucalyptus* sp. em região tropical do Brasil, conforme apresentado na caracterização da área de estudo (pág. 32), oriundos de um inventário florestal contínuo (IFC), em três unidades anuais de produção (UAP) com idades iniciais de 4,5, 3,5 e 2,5 anos (FIGURA 4.1), implantados nos anos 2007, 2008 e 2009, respectivamente. A Amostragem de Repetição Total (ART) de 845 unidades amostrais, distribuídas sistematicamente numa intensidade amostral de 1:2,5 hectares foi mensurada durante os anos 2011, 2012, 2013 e 2014.

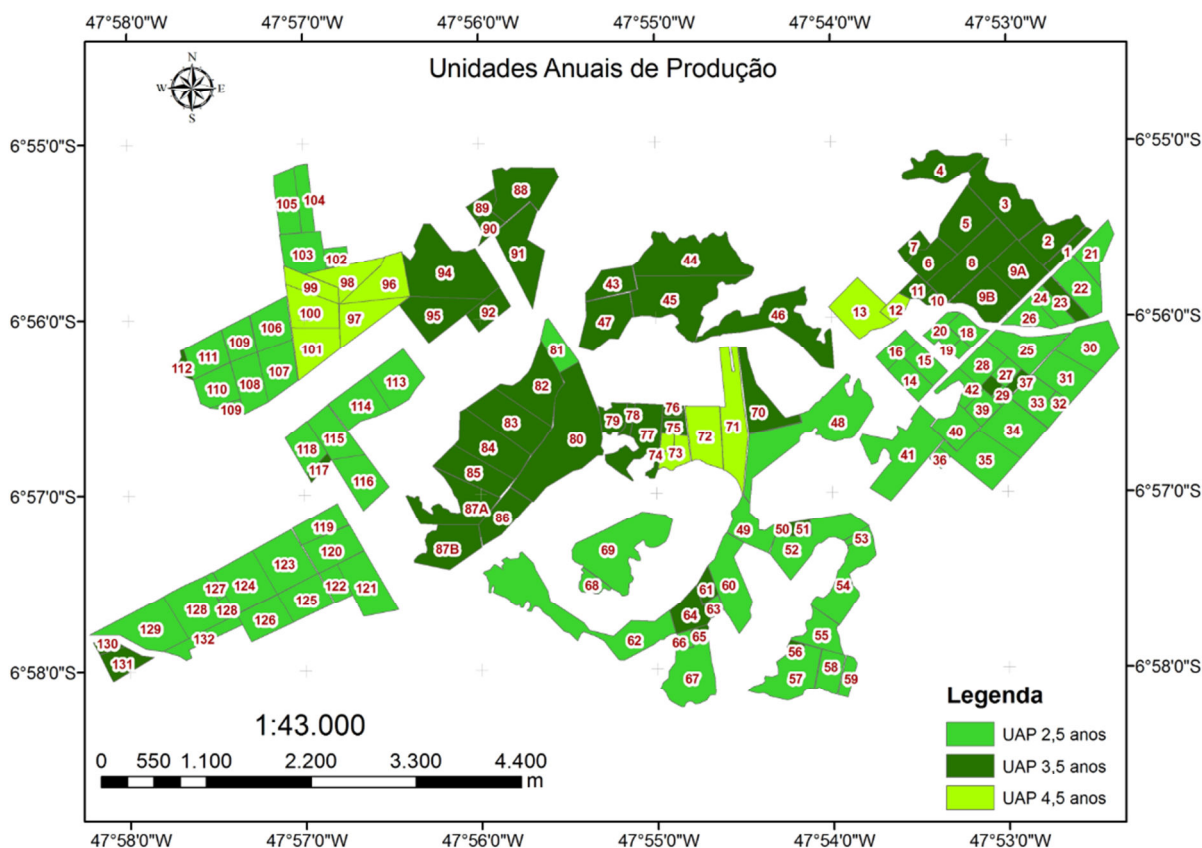


FIGURA 4.1 – UNIDADES ANUAIS DE PRODUÇÃO (UAP's) EM POVOAMENTOS DE *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.
FONTE: O autor (2015).

As áreas de cada UAP foram determinadas por processo de mapeamento com imagem de satélite (Spot 6) de alta resolução espectral (1,5 metros). Cada UAP é composta por “n” subunidades, denominadas talhão. Adicionalmente, com base na geoestatística da classificação de sítios, realizada no capítulo 1, via krigagem ordinária, foram determinados os limites geográficos (FIGURA 4.2) e as áreas (TABELA 4.1) de cada sítio.

O passo subsequente foi sortear randomicamente, dentro de cada UAP, aproximadamente 50% da área dos talhões para participar do rodízio no primeiro ano de mensuração (FIGURA 4.3) e no segundo ano do rodízio (FIGURA 4.4), pois para o presente estudo, o rodízio tem duração de 2 anos, fechando o segundo ciclo ao quarto ano de mensuração. O sítio é intrinsecamente amostrado em cada ano do rodízio e UAP, de acordo com sua probabilidade de ocorrência.

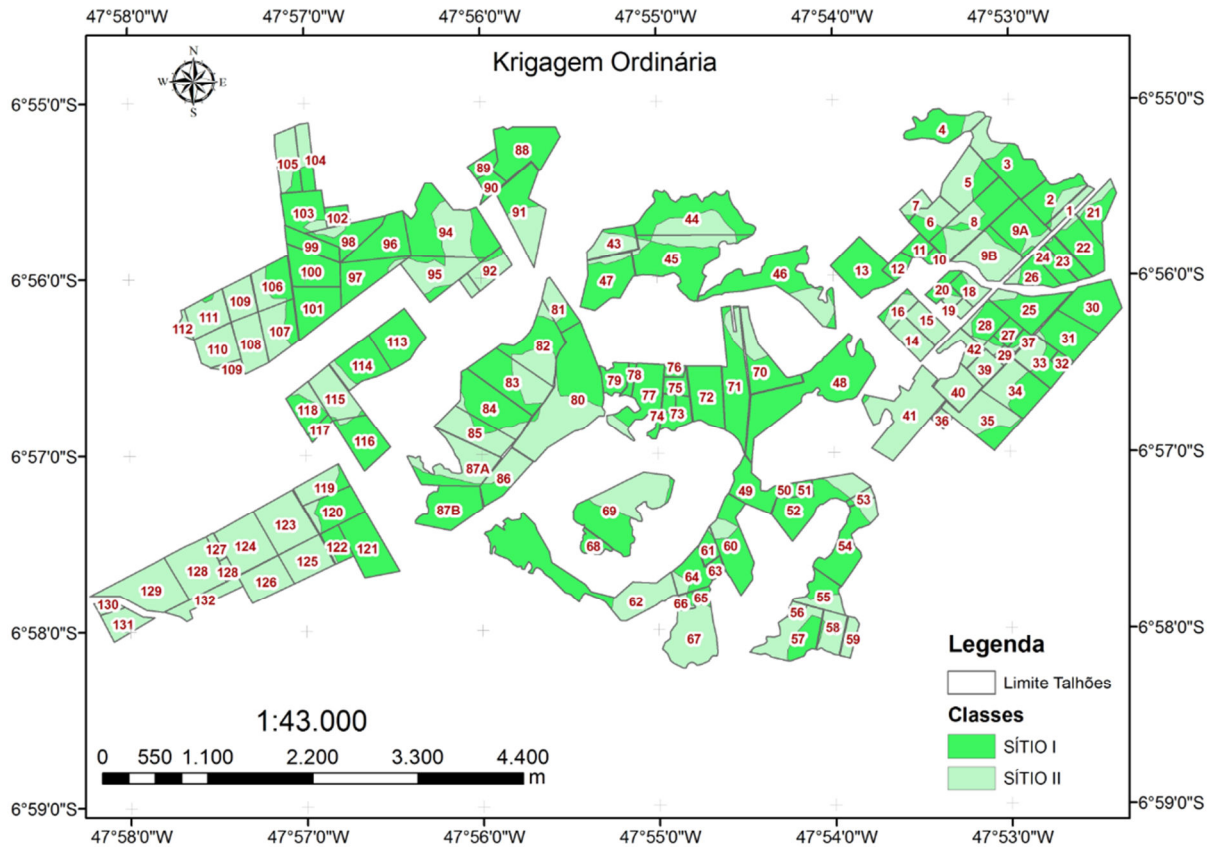


FIGURA 4.2 – MAPA TEMÁTICO DA KRIGAGEM ORDINÁRIA COM MODELO EXPONENCIAL EM POVOAMENTOS DE *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.
FONTE: O autor (2015).

Com base na maior intensidade amostral 1:2,5 hectares (FIGURA 4.5), foram geradas duas simulações adicionais, eliminando parcelas para gerar duas novas intensidades amostrais, sendo a primeira com intensidade de 1:5 hectares (FIGURA 4.6) e a segunda com intensidade de 1:10 hectares (FIGURA 4.7).

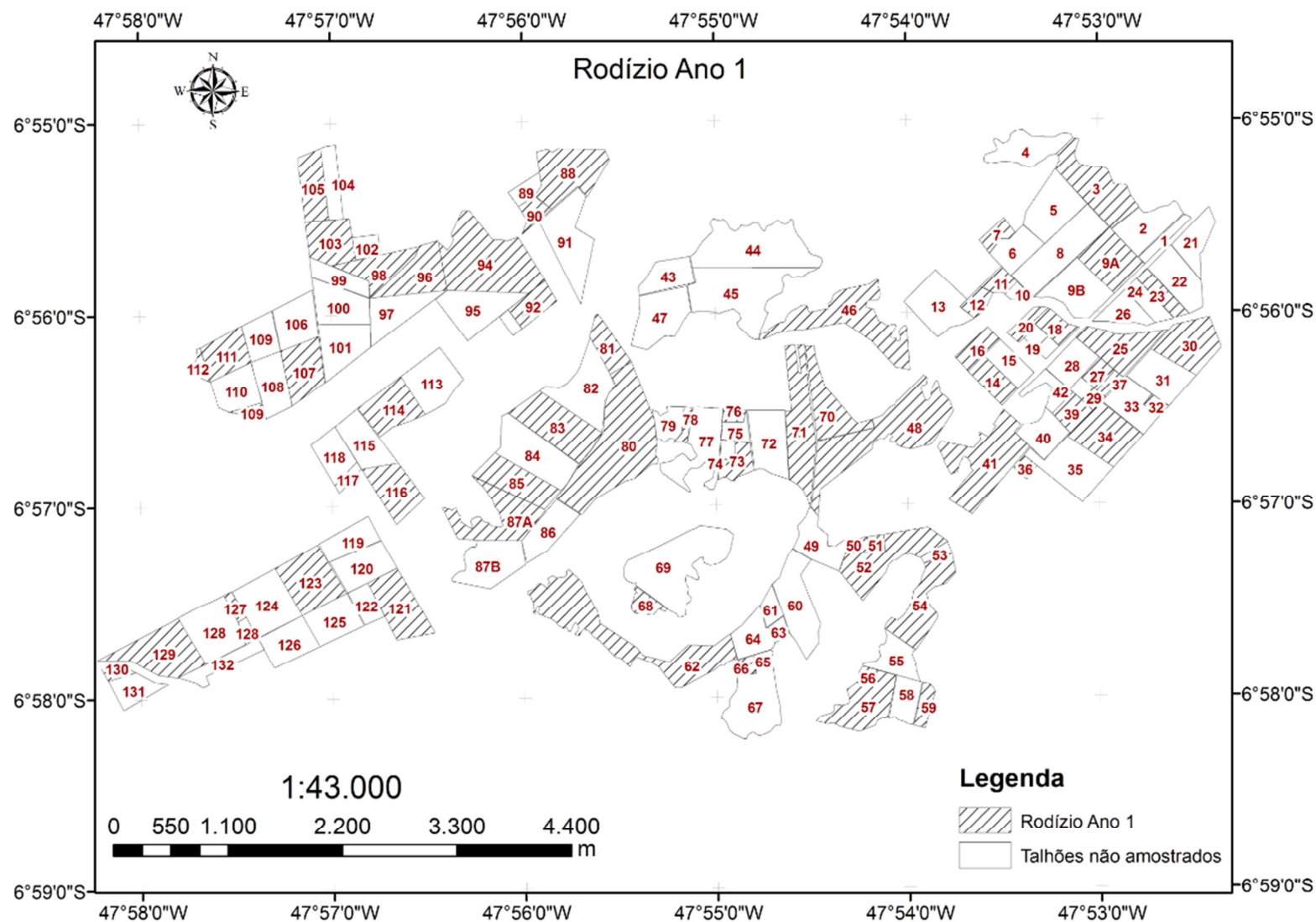


FIGURA 4.3 – TALHÕES SELECIONADOS PARA O PRIMEIRO ANO DE RODÍZIO EM POVOAMENTOS DE *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.

FONTE: O autor (2015).

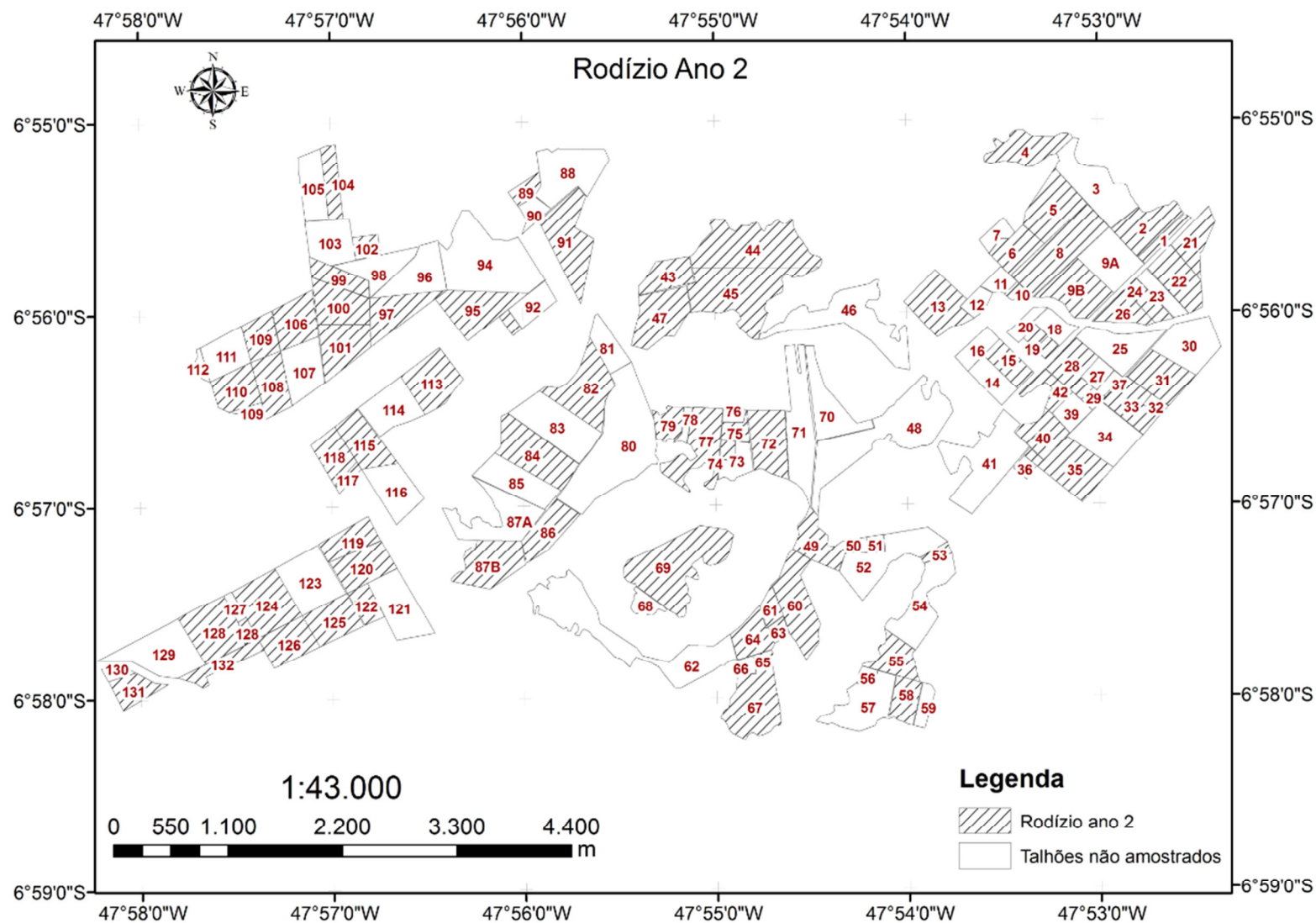


FIGURA 4.4 – TALHÕES SELECIONADOS PARA O SEGUNDO ANO DE RODÍZIO EM POVOAMENTOS DE *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.

FONTE: O autor (2015).

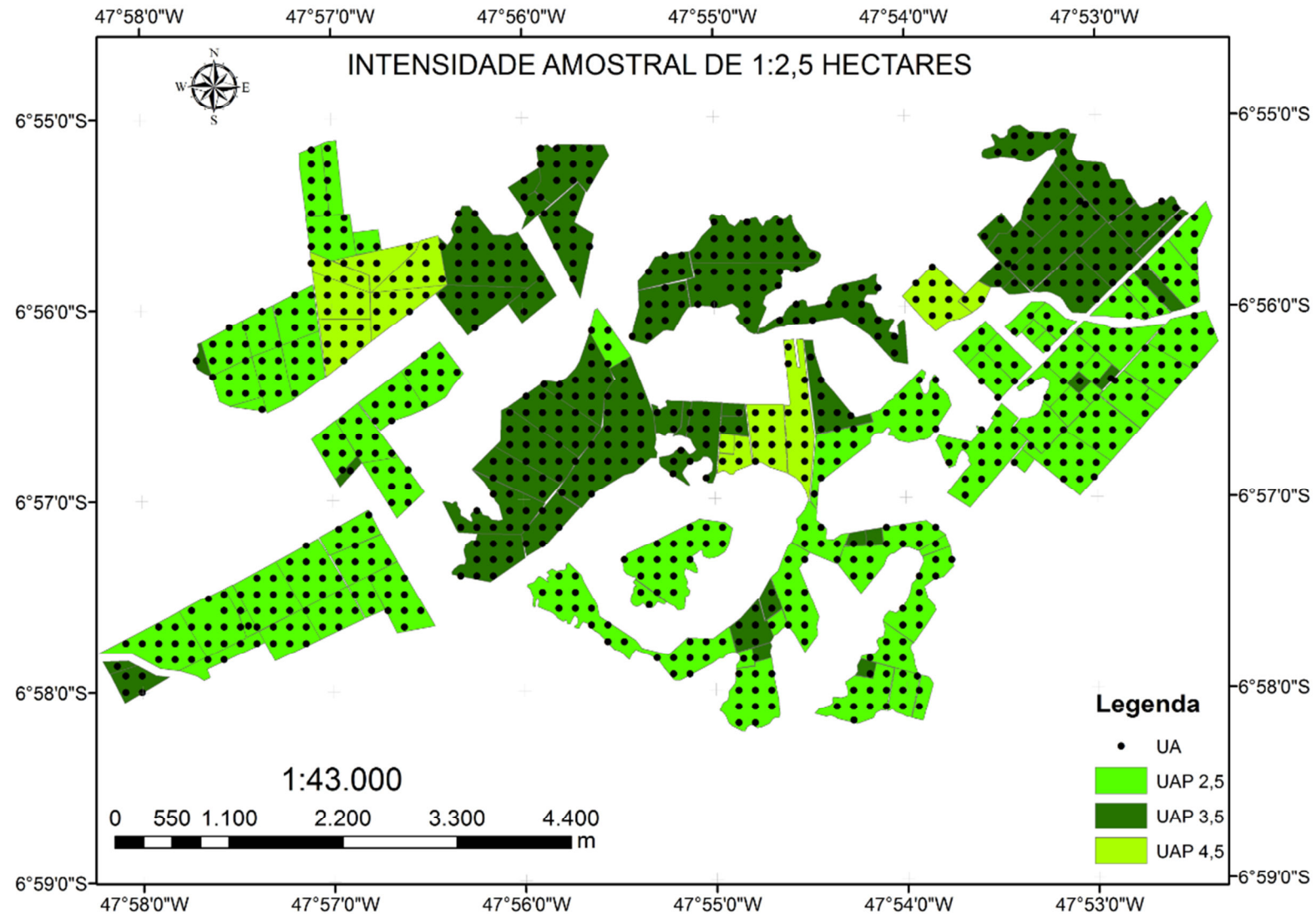


FIGURA 4.5 – PROCESSO DE AMOSTRAGEM SISTEMÁTICA NA INTENSIDADE 1:2,5 HECTARES EM POVOAMENTOS DE *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.
FONTE: O autor (2015).

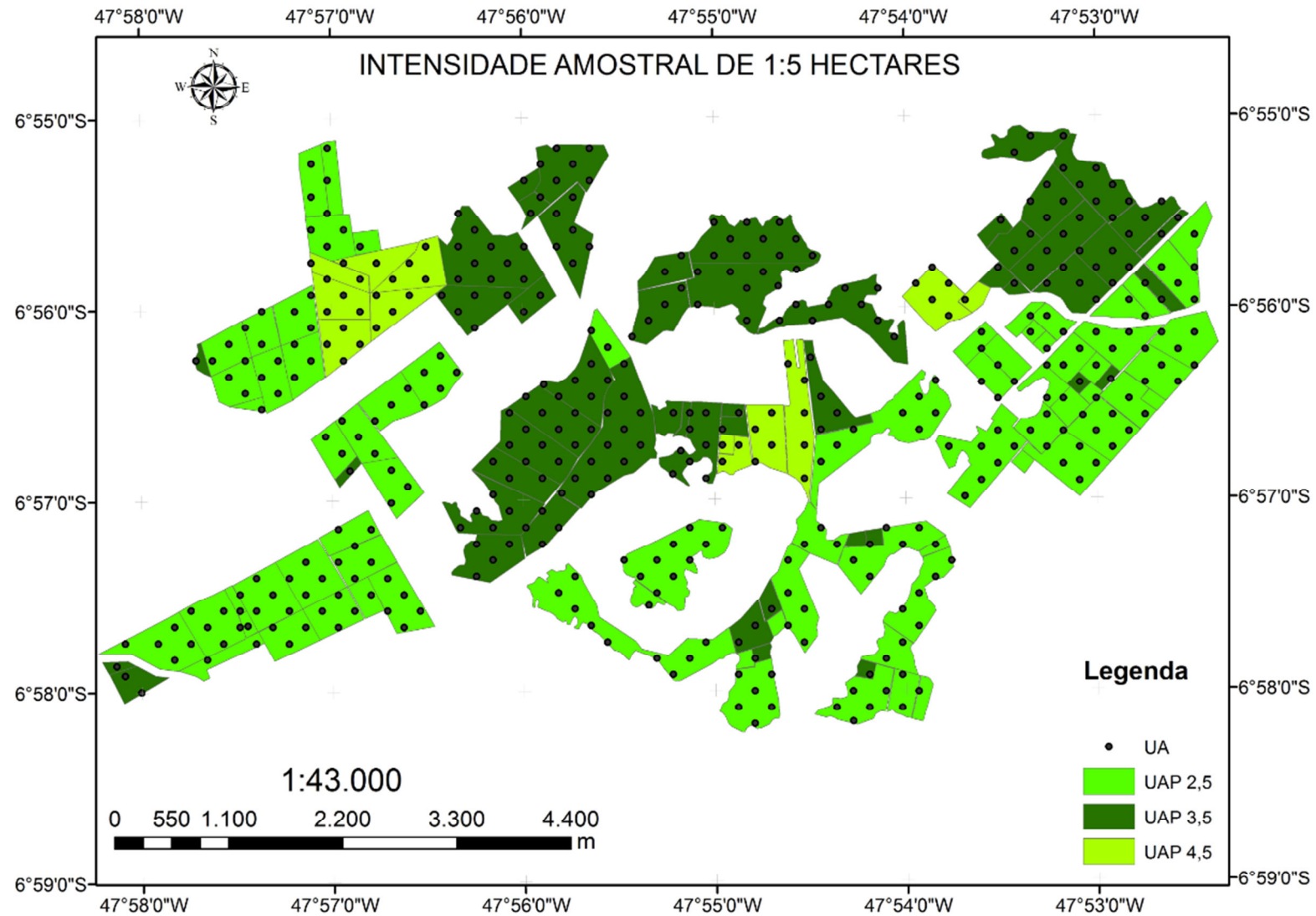


FIGURA 4.6 – PROCESSO DE AMOSTRAGEM SISTEMÁTICA NA INTENSIDADE 1:5 HECTARES EM POVOAMENTOS DE *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.
FONTE: O autor (2015).

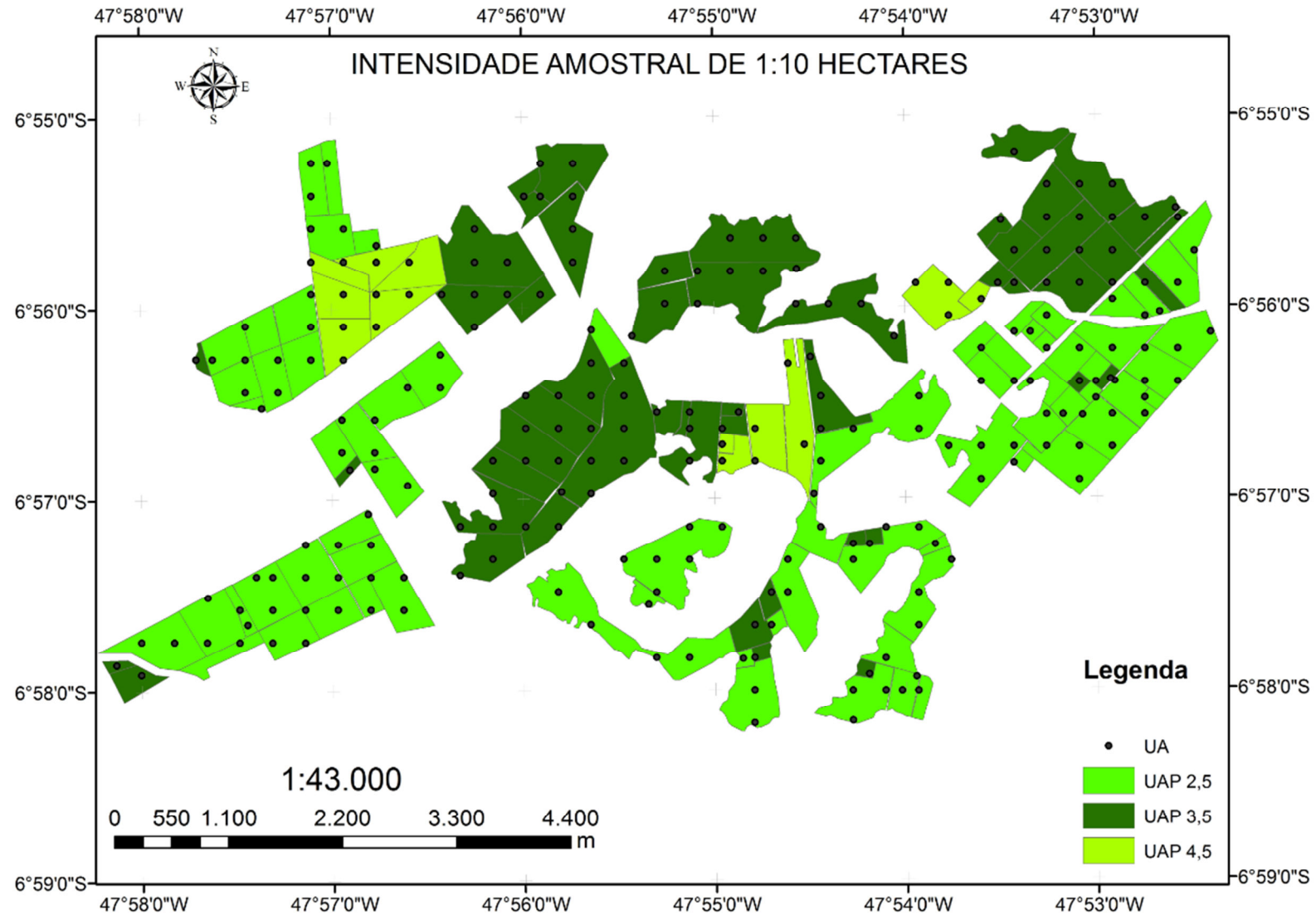


FIGURA 4.7 – PROCESSO DE AMOSTRAGEM SISTEMÁTICA NA INTENSIDADE 1:10 HECTARES EM POVOAMENTOS DE *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.
 FONTE: O autor (2015).

Com base nos processos de estratificação das UAP's, foram obtidos os pesos proporcionais em função da UAP ($W_i f \{UAP\}$) conforme tabela 1, do ano de rodízio ($W_i f \{Rodízio\}$) e da população total ($W_i f \{Total\}$), obtidos com base no capítulo 1. Tais proporcionalidades serão utilizadas nos estimadores da média estratificada e variância.

TABELA 4.1 – RESUMO DE ÁREAS POR ANO DE RODÍZIO, UAP E SÍTIO PARA *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.

Mensuração	UAP (ano)	Nº de UA	Classes	Área (hectare)	$W_{sj} f(UAP)$	$W_{sj} f(Rodízio)$	$W_{sj} f(Total)$
Rodízio ano 1	2,5	216	A_{UAP}	555,27	100,0%	48,8%	26,3%
		109	A_{SI}	226,72	40,8%	19,9%	10,7%
		107	A_{SII}	328,55	59,2%	28,9%	15,6%
	3,5	166	A_{UAP}	472,42	100,0%	41,5%	22,4%
		98	A_{SI}	289,45	61,3%	25,4%	13,7%
		68	A_{SII}	182,97	38,7%	16,1%	8,7%
	4,5	38	A_{UAP}	110,56	100,0%	9,7%	5,2%
		36	A_{SI}	109,68	99,2%	9,6%	5,2%
		2	A_{SII}	0,88	0,8%	0,1%	0,0%
	Subtotal ano 1	420	-	1.138,25	-	100,0%	53,9%
Rodízio ano 2	2,5	218	A_{UAP}	529,69	100,0%	54,5%	25,1%
		95	A_{SI}	289,71	54,7%	29,8%	13,7%
		123	A_{SII}	239,98	45,3%	24,7%	11,4%
	3,5	170	A_{UAP}	365,16	100,0%	37,6%	17,3%
		109	A_{SI}	217,97	59,7%	22,4%	10,3%
		61	A_{SII}	147,19	40,3%	15,1%	7,0%
	4,5	37	A_{UAP}	77,56	100,0%	8,0%	3,7%
		36	A_{SI}	70,40	90,8%	7,2%	3,3%
		1	A_{SII}	7,16	9,2%	0,7%	0,3%
	Subtotal ano 2	425	-	972,41	-	100,0%	46,1%
Total Geral	-	845		2.110,66	-	-	100,0%

FONTE: O autor (2015).

Para avaliar a eficiência do processo foram utilizados os cálculos de estatística de amostragem estratificada, conforme apresentadas em Péllico Netto e Brena, (1997) e Kangas e Maltamo (2006), sendo os estratos formados por UAP e classe de sítio. O valor de t para o processo estratificado foi calculado pelo método de Satterthwaite (1946).

A análise da variância (ANOVA) ao nível de 95% de probabilidade foi utilizada para testar a existência de diferenças significativas entres os resultados obtidos.

2.3 IMPACTOS DO PROCESSO DE AMOSTRAGEM EM RODÍZIO NAS ESTIMATIVAS DE PROGNOSE AO NÍVEL DE POVOAMENTO

Com a finalidade de testar o impacto do processo de amostragem em rodízio na modelagem da produção florestal foi testado o modelo explícito de crescimento e produção de Clutter (1963) apresentado em (13) e (14), aplicado aos dados de área basal, volume e sítio para resultar na produção ao longo da rotação da cultura, possibilitando confeccionar as curvas de incrementos médio anual (IMA) e corrente anual (ICA) do volume nas idades de 2,5 a 8 anos, por meio da primeira e segunda derivadas.

$$\ln(V_2) = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{I_1}\right) + \beta_2 S + \beta_3 \ln(G_2) + \ln(\varepsilon_i) \quad (13)$$

$$\ln(G_2) = \ln(G_1) \left(\frac{I_1}{I_2}\right) + \alpha_0 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) + \alpha_1 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) S + \ln(\varepsilon_i) \quad (14)$$

Em que:

$\ln(V_2)$ = Logaritmo neperiano do volume;

$\ln(G_1)$ = Logaritmo neperiano da área basal na idade 1;

$\ln(G_2)$ = Logaritmo neperiano da área basal na idade 2;

I_1 e I_2 = Idade no tempo 1 e 2, respectivamente (em meses);

S = Índice de sítio (m); e

$\beta_n \therefore \alpha_n$ = coeficientes de regressão.

O Modelo foi ajustado pelo método de mínimos quadrados em dois estágios, com auxílio do software Gretl, por meio da formulação de equações simultâneas. Ao todo foram elaborados seis ajustes, com os pares de dados das unidades amostrais permanentes, mensuradas entre 2011 e 2014 (TABELA 4.2). No processo apresentado como convencional toda amostra participa do ajuste do modelo, dentro de cada intensidade amostral, portanto as taxas de crescimento são computadas ano a ano. Já no processo em rodízio os dados são pareados com intervalos de 2

anos, dado a remediação da mesma unidade amostral ser realizado nesse intervalo.

TABELA 4.2 – SIMULAÇÕES PARA MODELAGEM DA PRODUÇÃO PARA *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.

Simulação	Processo de Amostragem	Intensidade Amostral
1	Convencional	1:2,5
2		1:5
3		1:10
4	Em Rodízio	1:2,5
5		1:5
6		1:10

FONTE: O autor (2015).

Ademais, as análises do erro padrão da estimativa em porcentagem (eq. 15), do coeficiente de determinação ajustado (eq. 16) e da tendência dos resíduos (17) foram utilizadas como critérios de avaliação da qualidade dos ajustamentos do modelo de Clutter (1963).

$$S_{yx}\% = \frac{S_{yx}}{\bar{y}} \cdot 100 \quad (15)$$

$$R^2_{aj} = 1 - \left[(R^2) \frac{(n-1)}{(n-p)} \right] \quad (16)$$

$$E(\%) = \frac{E_i}{y_i} \cdot 100 \quad (17)$$

Os coeficientes de regressão para o volume e área basal foram estimados pelo método dos mínimos quadrados em dois estágios, via sistema de equações simultâneas, com uso do software de regressão, econometria e séries temporais *Gretl*, versão 1.10.1 (<http://gretl.sourceforge.net/>).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 ESTIMADORES EM NÍVEL DE UAP E SÍTIO.

O processo de amostragem em rodízio apresentou resultados satisfatórios para todas as intensidades de amostragem (1:2,5, 1:5 e 1:10 hectares) a nível de UAP e classe de sítio. Nas tabelas 4.3, 4.5 e 4.7, estão apresentados os resultados obtidos para a variável volume ($\text{Vol.m}^3.\text{ha}^{-1}$), com o rodízio das intensidades 1:2,5, 1:5 e 1:10 hectares, respectivamente. Para melhor elucidar as comparações, em cada tabela está apresentado o valor comparativo, denominando Parâmetro de Referência por hectare (Par. Ref.ha^{-1}), obtido por meio da repetição total da maior intensidade amostral (1:2,5 hectares), sendo considerada essa, a melhor estimativa da população.

Com o intuito de obter os estimadores médios do volume por UAP, classe de sítio e ano de mensuração, foram geradas as tabelas 4.4, 4.6 e 4.8, as quais apresentam os volumes totais obtidos com cada intensidade amostral e a respectiva comparação com o Parâmetro de Referência Total (Par. Ref. Total), obtido na mesma concepção descrita para o volume por hectare.

TABELA 4.3 – ESTIMADORES POR HECTARE DA AMOSTRAGEM EM RODÍZIO NA INTENSIDADE DE 1:2,5 HECTARES PARA *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.

Tipo	UAP / Classes de Sítio	Área (hectare)	Nº de UA	Ano 2011 Vol. $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$	Ano 2012 Vol. $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$	Ano 2013 Vol. $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$	Ano 2014 Vol. $\text{m}^3.\text{ha}^{-1}$
Rodízio ano 1	UAP_{2,5}	555,27	216	68,15	-	163,37	-
	<i>A_{SI}</i>	226,72	109	73,16	-	186,93	-
	<i>A_{SII}</i>	328,55	107	63,05	-	139,38	-
	UAP_{3,5}	472,42	166	95,68	-	167,86	-
	<i>A_{SI}</i>	289,45	98	103,29	-	186,53	-
	<i>A_{SII}</i>	182,97	68	84,71	-	140,97	-
	UAP_{4,5}	110,56	38	158,68	-	257,07	-
	<i>A_{SI}</i>	109,68	36	161,70	-	262,85	-
	<i>A_{SII}</i>	0,88	2	104,28	-	153,01	-
	Subtotal ano 1	1.138,25	420	87,22	-	173,62	-
Rodízio ano 2	UAP_{2,5}	529,69	218	-	119,64	-	198,03
	<i>A_{SI}</i>	289,71	95	-	147,19	-	246,17
	<i>A_{SII}</i>	239,98	123	-	98,36	-	160,85

continua

Par. Ref. ha ⁻¹	conclusão					
	UAP_{3,5}	365,16	170	-	145,22	207,94
	<i>A_{SI}</i>	217,97	109	-	159,18	229,81
	<i>A_{SII}</i>	147,19	61	-	120,26	168,87
	UAP_{4,5}	77,56	37	-	215,09	289,69
	<i>A_{SI}</i>	70,40	36	-	216,49	291,73
	<i>A_{SII}</i>	7,16	1	-	164,88	216,06
	Subtotal ano 2	972,41	425	-	138,18	209,98
	UAP_{2,5}	1.084,96	434	68,80	119,39	162,65
	<i>A_{SI}</i>	516,43	204	76,88	139,60	194,35
	<i>A_{SII}</i>	568,54	230	61,64	101,45	134,54
	UAP_{3,5}	837,58	336	98,89	139,73	172,99
	<i>A_{SI}</i>	507,42	207	107,48	153,35	190,84
	<i>A_{SII}</i>	330,16	129	85,10	117,88	144,34
	UAP_{4,5}	188,12	75	158,36	216,70	261,70
	<i>A_{SI}</i>	180,09	72	160,44	219,88	265,70
	<i>A_{SII}</i>	8,04	3	108,51	140,29	165,56
	Total Geral	2.110,66	845	88,72	136,11	175,55
						208,54

FONTE: O autor (2015).

TABELA 4.4 – ESTIMADORES PARA A POPULAÇÃO DA AMOSTRAGEM EM RODÍZIO NA INTENSIDADE DE 1:2,5 HECTARES PARA *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.

Tipo	UAP / Classes de Sítio	Área (hectare)	Nº de UA	Ano 2011 Vol. m ³ TOTAL ⁻¹	Ano 2012 Vol. m ³ TOTAL ⁻¹	Ano 2013 Vol. m ³ TOTAL ⁻¹	Ano 2014 Vol. m ³ TOTAL ⁻¹
Rodízio ano 1	UAP_{2,5}	1.084,96	216	73.625,9	-	175.774,0	-
	<i>A_{SI}</i>	516,43	109	37.780,8	-	96.533,1	-
	<i>A_{SII}</i>	568,54	107	35.845,2	-	79.240,9	-
	UAP_{3,5}	837,58	166	80.378,8	-	141.189,4	-
	<i>A_{SI}</i>	507,42	98	52.411,7	-	94.645,9	-
	<i>A_{SII}</i>	330,16	68	27.967,0	-	46.543,5	-
	UAP_{4,5}	188,12	38	29.958,2	-	48.565,8	-
	<i>A_{SI}</i>	180,09	36	29.120,0	-	47.335,9	-
	<i>A_{SII}</i>	8,04	2	838,2	-	1.229,9	-
	Subtotal ano 1	2.110,66	420	183.962,9	-	365.529,2	-
Rodízio ano 2	UAP_{2,5}	1.084,96	218	-	131.935,3	-	218.579,4
	<i>A_{SI}</i>	516,43	95	-	76.015,1	-	127.129,3
	<i>A_{SII}</i>	568,54	123	-	55.920,3	-	91.450,1
	UAP_{3,5}	837,58	170	-	120.478,5	-	172.363,2
	<i>A_{SI}</i>	507,42	109	-	80.771,7	-	116.607,2
	<i>A_{SII}</i>	330,16	61	-	39.706,8	-	55.756,0
	UAP_{4,5}	188,12	37	-	40.311,9	-	54.273,4
	<i>A_{SI}</i>	180,09	36	-	38.986,6	-	52.536,8
	<i>A_{SII}</i>	8,04	1	-	1.325,3	-	1.736,6
	Subtotal ano 2	2.110,66	425	-	292.725,7	-	445.216,0
Par. Ref. Total	UAP_{2,5}	1.084,96	434	74.745,6	129.774,7	176.855,7	217.810,0
	<i>A_{SI}</i>	516,43	204	39.701,1	72.094,3	100.365,0	123.946,4
	<i>A_{SII}</i>	568,54	230	35.044,5	57.680,4	76.490,7	93.863,6

continua

						conclusão
UAP_{3,5}	837,58	336	82.636,6	116.729,4	144.490,5	169.090,7
<i>A_{SI}</i>	507,42	207	54.539,4	77.811,4	96.836,0	114.703,1
<i>A_{SII}</i>	330,16	129	28.097,3	38.918,1	47.654,4	54.387,6
UAP_{4,5}	188,12	75	29.764,4	40.725,6	49.179,6	53.221,5
<i>A_{SI}</i>	180,09	72	28.892,3	39.598,0	47.848,8	51.764,8
<i>A_{SII}</i>	8,04	3	872,2	1.127,6	1.330,8	1.456,7
Total Geral	2.110,66	845	187.146,7	287.229,8	370.525,7	440.122,2

FONTE: O autor (2015).

TABELA 4.5 – ESTIMADORES POR HECTARE DA AMOSTRAGEM EM RODÍZIO NA INTENSIDADE DE 1:5 HECTARES PARA *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.

Tipo	UAP / Classes de Sítio	Área (hectare)	Nº de UA	Ano 2011 Vol. m³ha ⁻¹	Ano 2012 Vol. m³ha ⁻¹	Ano 2013 Vol. m³ha ⁻¹	Ano 2014 Vol. m³ha ⁻¹
Rodízio ano 1	UAP_{2,5}	555,27	105	68,47	-	162,74	-
	<i>A_{SI}</i>	226,72	53	73,84	-	185,33	-
	<i>A_{SII}</i>	328,55	52	63,00	-	139,72	-
	UAP_{3,5}	472,42	94	97,92	-	170,81	-
	<i>A_{SI}</i>	289,45	54	108,46	-	193,73	-
	<i>A_{SII}</i>	182,97	40	83,70	-	139,88	-
	UAP_{4,5}	110,56	18	167,86	-	277,43	-
	<i>A_{SI}</i>	109,68	17	171,43	-	284,03	-
	<i>A_{SII}</i>	0,88	1	107,16	-	165,09	-
	Subtotal ano 1	1.138,25	217	89,47	-	175,75	-
Rodízio ano 2	UAP_{2,5}	529,69	105	-	118,23	-	197,20
	<i>A_{SI}</i>	289,71	43	-	151,09	-	252,72
	<i>A_{SII}</i>	239,98	62	-	95,43	-	158,69
	UAP_{3,5}	365,16	87	-	148,62	-	211,84
	<i>A_{SI}</i>	217,97	58	-	165,05	-	236,01
	<i>A_{SII}</i>	147,19	29	-	115,76	-	163,49
	UAP_{4,5}	77,56	21	-	215,62	-	285,07
	<i>A_{SI}</i>	70,40	20	-	215,62	-	285,07
	<i>A_{SII}</i>	7,16	1	-	164,88	-	216,06
	Subtotal ano 2	972,41	213	-	139,89	-	211,50
Par. Ref. ha ⁻¹	UAP_{2,5}	1.084,96	434	68,80	119,39	162,65	200,31
	<i>A_{SI}</i>	516,43	204	76,88	139,60	194,35	240,01
	<i>A_{SII}</i>	568,54	230	61,64	101,45	134,54	165,10
	UAP_{3,5}	837,58	336	98,89	139,73	172,99	202,51
	<i>A_{SI}</i>	507,42	207	107,48	153,35	190,84	226,05
	<i>A_{SII}</i>	330,16	129	85,10	117,88	144,34	164,73
	UAP_{4,5}	188,12	75	158,36	216,70	261,70	283,20
	<i>A_{SI}</i>	180,09	72	160,44	219,88	265,70	287,45
	<i>A_{SII}</i>	8,04	3	108,51	140,29	165,56	181,23
	Total Geral	2.110,66	845	88,72	136,11	175,55	208,54

FONTE: O autor (2015).

TABELA 4.6 – ESTIMADORES PARA A POPULAÇÃO DA AMOSTRAGEM EM RODÍZIO NA INTENSIDADE DE 1:5 HECTARES PARA *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.

Tipo	UAP / Classes de Sítio	Área (hectare)	Nº de UA	Ano 2011 Vol. m³ TOTAL ⁻¹	Ano 2012 Vol. m³ TOTAL ⁻¹	Ano 2013 Vol. m³ TOTAL ⁻¹	Ano 2014 Vol. m³ TOTAL ⁻¹
Rodízio ano 1	UAP_{2,5}	1.084,96	105	73.950,2	-	175.143,9	-
	<i>A_{SI}</i>	516,43	53	38.135,0	-	95.710,5	-
	<i>A_{SII}</i>	568,54	52	35.815,2	-	79.433,5	-
	UAP_{3,5}	837,58	94	82.668,0	-	144.483,4	-
	<i>A_{SI}</i>	507,42	54	55.034,7	-	98.300,1	-
	<i>A_{SII}</i>	330,16	40	27.633,2	-	46.183,3	-
	UAP_{4,5}	188,12	18	31.734,1	-	52.477,3	-
	<i>A_{SI}</i>	180,09	17	30.872,8	-	51.150,4	-
	<i>A_{SII}</i>	8,04	1	861,3	-	1.327,0	-
	Subtotal ano 1	2.110,66	217	188.352,4	-	372.104,6	-
Rodízio ano 2	UAP_{2,5}	1.084,96	105	-	132.285,2	-	220.732,8
	<i>A_{SI}</i>	516,43	43	-	78.027,9	-	130.510,4
	<i>A_{SII}</i>	568,54	62	-	54.257,4	-	90.222,4
	UAP_{3,5}	837,58	87	-	121.965,5	-	173.732,3
	<i>A_{SI}</i>	507,42	58	-	83.747,3	-	119.755,2
	<i>A_{SII}</i>	330,16	29	-	38.218,2	-	53.977,2
	UAP_{4,5}	188,12	21	-	40.155,5	-	53.074,3
	<i>A_{SI}</i>	180,09	20	-	38.830,2	-	51.337,7
	<i>A_{SII}</i>	8,04	1	-	1.325,3	-	1.736,6
	Subtotal ano 2	2.110,66	213	-	294.406,3	-	447.539,5
Par. Ref. Total	UAP_{2,5}	1.084,96	434	74.745,6	129.774,7	176.855,7	217.810,0
	<i>A_{SI}</i>	516,43	204	39.701,1	72.094,3	100.365,0	123.946,4
	<i>A_{SII}</i>	568,54	230	35.044,5	57.680,4	76.490,7	93.863,6
	UAP_{3,5}	837,58	336	82.636,6	116.729,4	144.490,5	169.090,7
	<i>A_{SI}</i>	507,42	207	54.539,4	77.811,4	96.836,0	114.703,1
	<i>A_{SII}</i>	330,16	129	28.097,3	38.918,1	47.654,4	54.387,6
	UAP_{4,5}	188,12	75	29.764,4	40.725,6	49.179,6	53.221,5
	<i>A_{SI}</i>	180,09	72	28.892,3	39.598,0	47.848,8	51.764,8
	<i>A_{SII}</i>	8,04	3	872,2	1.127,6	1.330,8	1.456,7
	Total Geral	2.110,66	845	187.146,7	287.229,8	370.525,7	440.122,2

FONTE: O autor (2015).

TABELA 4.7 – ESTIMADORES POR HECTARE DA AMOSTRAGEM EM RODÍZIO NA INTENSIDADE DE 1:10 HECTARES PARA *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.

Tipo	UAP / Classes de Sítio	Área (hectare)	Nº de UA	Ano 2011 Vol. m³ha ⁻¹	Ano 2012 Vol. m³ha ⁻¹	Ano 2013 Vol. m³ha ⁻¹	Ano 2014 Vol. m³ha ⁻¹
Rodízio ano 1	UAP_{2,5}	555,27	64	72,64	-	167,19	-
	<i>A_{SI}</i>	226,72	32	79,22	-	192,67	-
	<i>A_{SII}</i>	328,55	32	66,07	-	141,71	-
	UAP_{3,5}	472,42	52	97,76	-	170,59	-
	<i>A_{SI}</i>	289,45	30	106,94	-	194,81	-
	<i>A_{SII}</i>	182,97	22	85,25	-	137,56	-

continua

							conclusão
	UAP_{4,5}	110,56	9	157,72	-	255,38	-
	<i>A_{SI}</i>	109,68	9	157,72	-	255,38	-
	<i>A_{SII}</i>	0,88	1	107,16	-	165,09	-
	Subtotal ano 1	1.138,25	125	89,22	-	174,95	-
Rodízio ano 2	UAP_{2,5}	529,69	62	-	114,37	-	189,06
	<i>A_{SI}</i>	289,71	27	-	139,25	-	233,62
	<i>A_{SII}</i>	239,98	35	-	95,18	-	154,68
	UAP_{3,5}	365,16	46	-	148,50	-	214,46
	<i>A_{SI}</i>	217,97	31	-	164,99	-	237,92
	<i>A_{SII}</i>	147,19	15	-	114,41	-	165,98
	UAP_{4,5}	77,56	11	-	222,35	-	282,43
	<i>A_{SI}</i>	70,40	11	-	222,35	-	282,43
	<i>A_{SII}</i>	7,16	1	-	164,88	-	216,06
	Subtotal ano 2	972,41	119	-	137,54	-	207,51
Par. Ref.	UAP_{2,5}	1.084,96	434	68,80	119,39	162,65	200,31
	<i>A_{SI}</i>	516,43	204	76,88	139,60	194,35	240,01
	<i>A_{SII}</i>	568,54	230	61,64	101,45	134,54	165,10
	UAP_{3,5}	837,58	336	98,89	139,73	172,99	202,51
	<i>A_{SI}</i>	507,42	207	107,48	153,35	190,84	226,05
	<i>A_{SII}</i>	330,16	129	85,10	117,88	144,34	164,73
	UAP_{4,5}	188,12	75	158,36	216,70	261,70	283,20
	<i>A_{SI}</i>	180,09	72	160,44	219,88	265,70	287,45
	<i>A_{SII}</i>	8,04	3	108,51	140,29	165,56	181,23
	Total Geral	2.110,66	845	88,72	136,11	175,55	208,54

FONTE: O autor (2015).

TABELA 4.8 – ESTIMADORES PARA A POPULAÇÃO DA AMOSTRAGEM EM RODÍZIO NA INTENSIDADE DE 1:10 HECTARES PARA *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.

Tipo	UAP / Classes de Sítio	Área (hectare)	Nº de UA	Ano 2011 Vol. m³ TOTAL ⁻¹	Ano 2012 Vol. m³ TOTAL ⁻¹	Ano 2013 Vol. m³ TOTAL ⁻¹	Ano 2014 Vol. m³ TOTAL ⁻¹
Rodízio ano 1	UAP_{2,5}	1.084,96	64	78.472,4	-	180.068,5	-
	<i>A_{SI}</i>	516,43	32	40.909,6	-	99.499,0	-
	<i>A_{SII}</i>	568,54	32	37.562,7	-	80.569,5	-
	UAP_{3,5}	837,58	52	82.410,7	-	144.265,2	-
	<i>A_{SI}</i>	507,42	30	54.264,2	-	98.847,9	-
	<i>A_{SII}</i>	330,16	22	28.146,5	-	45.417,2	-
	UAP_{4,5}	188,12	9	29.264,5	-	47.318,1	-
	<i>A_{SI}</i>	180,09	9	28.403,2	-	45.991,1	-
	<i>A_{SII}</i>	8,04	1	861,3	-	1.327,0	-
	Subtotal ano 1	2.110,66	125	190.147,6	-	371.651,7	-
Rodízio ano 2	UAP_{2,5}	1.084,96	62	-	126.022,1	-	208.589,1
	<i>A_{SI}</i>	516,43	27	-	71.911,4	-	120.645,5
	<i>A_{SII}</i>	568,54	35	-	54.110,7	-	87.943,6
	UAP_{3,5}	837,58	46	-	121.494,0	-	175.523,3
	<i>A_{SI}</i>	507,42	31	-	83.719,8	-	120.723,5

continua

							conclusão
Rodízio ano 2	A_{SII}	330,16	15	-	37.774,2	-	54.799,8
	UAP_{4,5}	188,12	11	-	41.366,7	-	52.598,3
	A_{SI}	180,09	11	-	40.041,4	-	50.861,6
	A_{SII}	8,04	1	-	1.325,3	-	1.736,6
	Subtotal ano 2	2.110,66	119	-	288.882,8	-	436.710,7
Par. Ref. Total	UAP_{2,5}	1.084,96	434	74.745,6	129.774,7	176.855,7	217.810,0
	A_{SI}	516,43	204	39.701,1	72.094,3	100.365,0	123.946,4
	A_{SII}	568,54	230	35.044,5	57.680,4	76.490,7	93.863,6
	UAP_{3,5}	837,58	336	82.636,6	116.729,4	144.490,5	169.090,7
	A_{SI}	507,42	207	54.539,4	77.811,4	96.836,0	114.703,1
	A_{SII}	330,16	129	28.097,3	38.918,1	47.654,4	54.387,6
	UAP_{4,5}	188,12	75	29.764,4	40.725,6	49.179,6	53.221,5
	A_{SI}	180,09	72	28.892,3	39.598,0	47.848,8	51.764,8
	A_{SII}	8,04	3	872,2	1.127,6	1.330,8	1.456,7
Total Geral		2.110,66	845	187.146,7	287.229,8	370.525,7	440.122,2

FONTE: O autor (2015).

Com base nos estimadores apresentados por *UAP* e sítio o processo de amostragem em rodízio para povoamentos se demonstrou estável, resultando em valores coerentes para todos os anos e níveis inventariados. O processo AR pode ser empregado para aumentar o nível de detalhamento dos atuais sistemas de amostragem das empresas florestais, dado que o atual número de *U.A.* utilizados por ano de mensuração poderá ser concentrado em 50% dos talhões de cada *UAP*, tornando desnecessárias a realização de inventários pré-corte (IPC).

De forma adicional a AR demonstrou ser um processo eficaz na minoração substancial de custos dos inventários florestais, uma vez que os estimadores se mantiveram estáveis quando utilizada a intensidade amostral de 1:10 ha em 50% de talhões.

Um resumo dos volumes obtidos por *UAP* para o total da população, nos diferentes níveis de intensidade amostral com o processo de amostragem em rodízio em comparação ao Parâmetro de Referência para o Total (PRT) está apresentado na tabela 4.9, com a maior diferença nas estimativas é observada para a intensidade 1:10ha na *UAP_{2,5}*, com -4,2%, seguido da intensidade 1:10ha na *UAP_{3,5}*, com 3,8%. Já as menores diferenças são identificadas para a intensidade 1:5ha na *UAP_{4,5}*, com -0,3% e a intensidade 1:2,5ha na *UAP_{2,5}*, com 0,4%.

TABELA 4.9 – RESUMO DOS ESTIMADORES PARA A POPULAÇÃO COM A AMOSTRAGEM EM RODÍZIO NAS DIFERENTES INTENSIDADES AMOSTRAIS COMPARADO COM O PRT PARA *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.

UAP	Área (hectare)	Tipo	Ano 2011 Vol. m ³ TOTAL ⁻¹	Ano 2012 Vol. m ³ TOTAL ⁻¹	Ano 2013 Vol. m ³ TOTAL ⁻¹	Ano 2014 Vol. m ³ TOTAL ⁻¹	Dif. Ano 2014 (%)
UAP _{2,5}	1.084,96	1:2,5	73.625,9	131.935,3	175.774,0	218.579,4	0,4%
		1:5	73.950,2	132.285,2	175.143,9	220.732,8	1,3%
		1:10	78.472,4	126.022,1	180.068,5	208.589,1	-4,2%
		PRT	74.745,6	129.774,7	176.855,7	217.810,0	-
UAP _{3,5}	837,58	1:2,5	80.378,8	120.478,5	141.189,4	172.363,2	1,9%
		1:5	82.668,0	121.965,5	144.483,4	173.732,3	2,7%
		1:10	82.410,7	121.494,0	144.265,2	175.523,3	3,8%
		PRT	82.636,6	116.729,4	144.490,5	169.090,7	-
UAP _{4,5}	188,12	1:2,5	29.958,2	40.311,9	48.565,8	54.273,4	2,0%
		1:5	31.734,1	40.155,5	52.477,3	53.074,3	-0,3%
		1:10	29.264,5	41.366,7	47.318,1	52.598,3	-1,2%
		PRT	29.764,4	40.725,6	49.179,6	53.221,5	-
Total	2.110,66	1:2,5	183.962,9	292.725,7	365.529,2	445.216,0	1,2%
		1:5	188.352,4	294.406,3	372.104,6	447.539,5	1,7%
		1:10	190.147,6	288.882,8	371.651,7	436.710,7	-0,8%
		PRT	187.146,7	287.229,8	370.525,7	440.122,2	-

Em que: Tipo: intensidades amostrais; PRT: Parâmetro de Referência para o Total; Dif. Ano 2014 (%): diferença % entre PRT e o Tipo, com base no ano de 2014. FONTE: O autor (2015).

Com base na tabela 4.9, foi elaborada a análise da variância (ANOVA) apresentada na tabela 4.10, formulada com base nas diferenças absolutas do volume, na qual resulta a aceitação da hipótese de nulidade (h_0) permitindo inferir que há igualdade estatística dos volumes totais obtidos pelo processo de amostragem em rodízio, nas diferentes intensidades amostrais, quando comparado com o parâmetro de referência para o total (PRT) ao nível de 95% de probabilidade ($F < F$ crítico).

TABELA 4.10 – ANOVA DOS ESTIMADORES PARA A POPULAÇÃO TOTAL PARA *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.

Fonte da variação	SQ	gl	QM	F	F Crítico
Entre grupos	4,5831	3	1,5277	1,1937	3,4903
Dentro dos grupos	15,3576	12	1,2798	-	-
Total	19,9408	15	-	-	-

Em que: SQ: Soma de Quadrados; gl: graus de liberdade; QM: Quadrado Médio; F crítico: Valor tabelado de Fischer a 95% de probabilidade; F: QM Entre estratos dividido pelo QM Dentro dos estratos.

FONTE: O autor (2015).

A eficiência do processo de amostragem em rodízio foi comprovada para as

diferentes intensidades amostrais, sendo apropriada para estimar volumes por *UAP* e classe de sítio para o povoamento em estudo, contribuindo significativamente para a redução de custos das atividades de inventário florestal contínuo ou intensificação do sistema de amostragem adotado pelas empresas florestais.

3.2 ANÁLISE ESTATÍSTICA DA AMOSTRAGEM ESTRATIFICADA

Na tabela 4.11 estão apresentados os coeficientes de variação (CV) para cada *UAP*, classes de sítio e ano de mensuração, quando é possível constatar uma ligeira queda do CV quanto maior for o nível de estratificação, corroborando para a melhoria dos estimadores estatísticos na forma estratificada. O maior CV encontrado é de 41,8%, referente ao ano de 2011, quando analisado sem nível de estratificação, enquanto o menor CV de 7,3% é obtido para a área do sítio 2 (A_{SII}) para a $UAP_{4,5}$.

TABELA 4.11 – ESTIMADORES AMOSTRAIS DA PRT PARA A $UAP_{4,5}$, SEUS COMPARTIMENTOS E CLASSES DE SÍTIO PARA *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.

Mensuração	UAP (ano)	Área (hectare)	Classes	CV no Ano 2011	CV no Ano 2012	CV no Ano 2013	CV no Ano 2014
Par. Ref. ha ₁	2,5	1.084,96	A_{UAP}	27,6%	28,7%	31,3%	30,5%
		516,43	A_{SI}	26,5%	24,0%	24,9%	23,1%
		568,54	A_{SII}	23,0%	22,8%	25,0%	25,0%
	3,5	837,58	A_{UAP}	29,9%	29,7%	29,6%	29,2%
		507,42	A_{SI}	26,4%	26,1%	26,1%	25,0%
		330,16	A_{SII}	30,8%	28,5%	26,9%	25,1%
	4,5	188,12	A_{UAP}	27,6%	27,7%	30,9%	30,3%
		180,09	A_{SI}	27,0%	26,8%	30,0%	29,5%
		8,04	A_{SII}	7,3%	15,2%	15,0%	18,4%
	Total	2.110,66	-	41,8%	35,4%	34,6%	32,2%

Em que: CV%: Coeficiente de Variação.

FONTE: O autor (2015).

Para Péllico Netto e Brena (1997), a estratificação da população somente resultará em ganhos de precisão das estimativas quando as médias entre estratos são significativamente diferentes. Portanto, foi elaborada uma análise da variância

(ANOVA), baseada nas diferenças absolutas do volume para tornar explícita a existência de diferenças significativas ao nível de 95% de probabilidade para o processo de estratificação realizado (TABELA 4.12).

TABELA 4.12 – ANOVA DOS ESTRATOS FORMADOS PARA *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.

Fonte da variação	SQ	gl	QM	F	F crítico
Entre estratos	34.356,14	5	6.871,23	35,25	2,77
Dentro dos estratos	3.508,73	18	194,93	-	-
Total	37.864,87	23	-	-	-

Em que: SQ: Soma de Quadrados; gl: graus de liberdade; QM: Quadrado Médio; F crítico: Valor tabelado de Fischer a 95% de probabilidade; F: QM Entre estratos dividido pelo QM Dentro dos estratos.

FONTE: O autor (2015).

Como resultado o valor de (F) de Fischer calculado é maior que o valor tabelado (F crítico), a hipótese de nulidade foi rejeitada, assumindo a hipótese alternativa (h_1), que resulta em diferenças significativas para as médias dos estratos definidos, ao nível de 95% de probabilidade.

A estatística de amostragem estratificada para o volume ($m^3 \cdot ha^{-1}$), foi obtida com base na soma da área das UAP's e respectivas classes de sítio (TABELA 4.13).

TABELA 4.13 – ESTRATOS, RESPECTIVAS ÁREAS E PESOS PARA *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.

Estrato	Área (hectare)	Peso W_{sj} %
$UAP_{2,5}A_{SI}$	516,43	24,47%
$UAP_{2,5}A_{SII}$	568,54	26,94%
$UAP_{3,5}A_{SI}$	507,42	24,04%
$UAP_{3,5}A_{SII}$	330,16	15,64%
$UAP_{4,5}A_{SI}$	180,09	8,53%
$UAP_{4,5}A_{SII}$	8,04	0,38%
Total	2.110,68	100%

FONTE: O autor (2015).

Na Tabela 4.14 estão apresentados os resultados de cada intensidade amostral (I.A.) e ano de inventário (Ano). Os erros padrões percentuais, encontram-se entre 2,33 e 5,18%, considerados apropriados para inventários florestais contínuos, em que geralmente o erro pré-estabelecido é de 10% (SANQUETTA *et al.*, 2014).

TABELA 4.14 – ANÁLISE ESTATÍSTICA ESTRATIFICADA PARA POVOAMENTOS DE *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.

I.A.	Ano	\bar{x}_{sj}	s^2_{sj}	$s^2_{\bar{x}}$	t	Erro Padrão	Erro Padrão %
1:2,5	2011	87,2	566,42	1,24	1,969	1,11	2,51%
	2012	138,2	1343,69	2,87	1,967	1,69	2,40%
	2013	173,6	2181,89	4,74	1,969	2,18	2,48%
	2014	210,0	2918,12	6,25	1,967	2,50	2,33%
1:5	2011	89,5	495,99	2,18	1,984	1,48	3,28%
	2012	139,9	1337,25	6,03	1,973	2,45	3,47%
	2013	175,8	2098,20	9,37	1,986	3,06	3,45%
	2014	211,5	3121,54	14,03	1,972	3,75	3,48%
1:10	2011	89,2	624,96	5,00	2,005	2,24	4,98%
	2012	137,5	1207,23	10,15	1,989	3,19	4,63%
	2013	174,9	2556,88	20,47	2,014	4,52	5,18%
	2014	207,5	2376,47	19,68	1,983	4,44	4,25%

Em que: I.A.: Intensidade Amostral; \bar{x}_{sj} : Média Estratificada do volume $m^3.ha^{-1}$; s^2_{sj} : Variância Estratificada do volume $m^3.ha^{-1}$; $s^2_{\bar{x}}$: Variância da Média do volume $m^3.ha^{-1}$; t : Valor da tabela de Student ao nível α 5%, onde os graus de liberdade foram obtidos conforme proposta de Satterthwaite (1946), apresentada em Péllico Netto e Brena 1997.

FONTE: O autor (2015).

Na tabela 4.15 estão apresentados os resultados obtidos para o intervalo de confiança para o volume total, para cada ano de inventário e intensidade amostral.

TABELA 4.155 – INTERVALO DE CONFIANÇA DO VOLUME TOTAL PARA POVOAMENTOS DE *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.

I.A.	Ano	Limite inferior (m^3)	Média (m^3)	Limite Superior (m^3)
1:2,5	2011	179.345,2	183.962,9	188.580,6
	2012	285.686,7	292.725,7	299.764,8
	2013	356.479,5	365.529,2	374.578,8
	2014	434.835,5	445.216,0	455.596,5
1:5	2011	182.168,6	188.352,4	194.536,1
	2012	284.179,9	294.406,3	304.632,6
	2013	359.264,5	372.104,6	384.944,8
	2014	431.945,7	447.539,5	463.133,2
1:10	2011	180.681,2	190.147,6	199.614,1
	2012	275.507,5	288.882,8	302.258,0
	2013	352.418,3	371.651,7	390.885,1
	2014	418.137,3	436.710,7	455.284,1

Em que: I.A.: Intensidade Amostral.

FONTE: O autor (2015).

Os intervalos de confiança estimados para o volume total da população são intrinsecamente relacionados ao erro padrão %, sendo mais amplos quanto maior o erro associado à amostragem. Nesse contexto, a intensidade amostral 1:2,5 apresentou os menores erros amostrais, variando entre 2,40 e 2,51%, ao passo que a intensidade amostral 1:5 resultou em erros variando entre 3,28 e 3,47% e a intensidade 1:10 entre 4,25 e 5,18%.

3.3 ANÁLISE DO CRESCIMENTO E DA PRODUÇÃO FLORESTAL

Como os inventários florestais contínuos são amplamente utilizados como base de dados para gerar as estimativas de crescimento e produção da população a uma dada idade de referência, que neste trabalho se considerou 84 meses ou 7 anos, foram elaboradas 6 simulações com os dados resultantes das mensurações anuais das UA pelo método convencional e em rodízio, nas diferentes intensidades amostrais, conforme apresentado na tabela 4.2, objetivando demonstrar que o processo de amostragem em rodízio não afeta a precisão dos estimadores de regressão e as estimativas da prognose.

A tabela 4.16 apresenta os parâmetros do modelo de Clutter (1963), o coeficiente de determinação ajustado (R^2_{ajust}) e erro padrão da estimativa ($S_{yx}\%$) para cada simulação.

TABELA 4.166 – PARAMETROS E ESTATÍSTICA DO MODELO DE CLUTTER (1963) PARA AS DIFERENTES SIMULAÇÕES EM POVOAMENTOS DE *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.

Parâmetro	Simulação					
	1 CON 1:2,5	2 CON 1:5	3 CON 1:10	4 ROD 1:2,5	5 ROD 1:5	6 ROD 1:10
β_0	1,1976	1,2281	1,2483	1,2051	1,2436	1,3512
β_1	-17,6276	-18,1930	-18,7264	-18,5261	-19,9366	-21,6811
β_2	0,0318	0,0324	0,0317	0,0359	0,0379	0,0369
β_3	1,1617	1,1480	1,1534	1,1235	1,0963	1,0806
α_0	0,7977	0,6433	0,7441	0,8883	0,9201	0,8807
α_1	0,0876	0,0928	0,0896	0,0845	0,0837	0,0849

continua

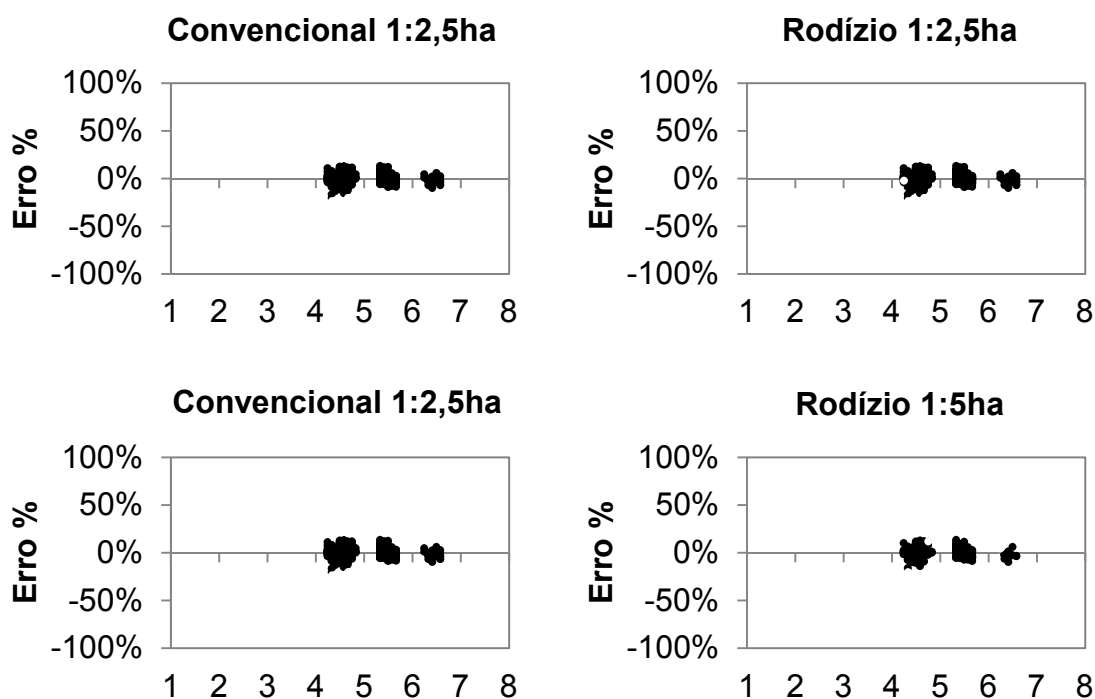
	conclusão					
R^2_{ajust}	0,957	0,959	0,959	0,951	0,952	0,946
$S_{yx}\%$	7,88%	7,93%	7,74%	7,57%	7,69%	7,76%

Em que: CON: processo de amostragem convencional para as intensidades amostrais de 1:2,5, 1:5 e 1:10 hectares; ROD: processo de amostragem em rodízio para as intensidades amostrais de 1:2,5, 1:5 e 1:10 hectares.

FONTE: O autor (2015).

Com base na estatística das simulações, nota-se que para os diferentes processos de amostragem (convencional e rodízio) e intensidades utilizadas, os valores são similares, com $R^2_{ajust.}$ variando entre 0,946 e 0,959 e $S_{yx}\%$ variando entre 7,57 e 7,93%, demonstrando estabilidade nas estatísticas de correlação e precisão do modelo, respectivamente.

Adicionalmente, a (FIGURA 4.8) retrata a estabilidade e similaridade dos resíduos para o método convencional e rodízio, nas intensidades amostrais de 1:2,5, 1:5 e 1:10 hectares, não sendo constatados tendenciosidade.



Continua

conclusão

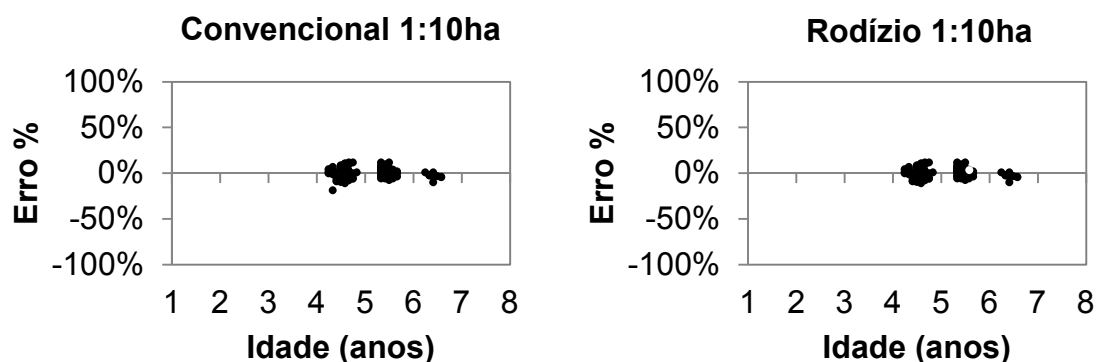


FIGURA 4.8 – DISTRIBUIÇÃO GRÁFICA RESIDUAL DO MODELO DE CLUTTER (1963) EM POVOAMENTOS DE *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.
FONTE: O autor (2015).

A prognose do volume por hectare ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$), para a idade de referência de 7 anos, de cada *UAP* e classe de sítio estão apresentados na tabela 4.17.

TABELA 4.177 – PROGNOSE DO VOLUME POR HECTARE AOS 7 ANOS PARA AS DIFERENTES SIMULAÇÕES EM POVOAMENTOS DE *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.

Estrato	Simulação					
	1 CON 1:2,5	2 CON 1:5	3 CON 1:10	4 ROD 1:2,5	5 ROD 1:5	6 ROD 1:10
<i>UAP</i>_{2,5}	225,5	224,9	224,5	226,6	226,1	226,1
<i>UAP</i> _{2,5} <i>A_{SI}</i>	269,2	271,4	268,2	269,8	272,2	267,3
<i>UAP</i> _{2,5} <i>A_{SII}</i>	186,8	185,7	186,1	188,3	187,3	189,9
<i>UAP</i>_{2,5}	212,5	215,7	216,9	214,2	217,9	219,0
<i>UAP</i> _{3,5} <i>A_{SI}</i>	236,3	243,8	244,5	237,9	245,8	246,7
<i>UAP</i> _{3,5} <i>A_{SII}</i>	174,4	170,2	171,5	176,1	172,7	173,2
<i>UAP</i>_{3,5}	281,7	283,0	283,1	285,0	291,8	282,3
<i>UAP</i> _{4,5} <i>A_{SI}</i>	286,0	286,0	283,1	288,8	294,2	282,3
<i>UAP</i> _{4,5} <i>A_{SII}</i>	179,6	171,3	176,1	193,0	202,9	195,6
Total geral	225,3	226,2	226,3	226,8	228,5	227,9

Em que: CON e ROD: descritos anteriormente.

FONTE: O autor (2015).

Os estimadores do volume por hectare apresentados na tabela 4.17 encontram-se estáveis entre as 6 simulações realizadas em todas as *UAP*'s e suas classes de sítio (FIGURA 4.9).

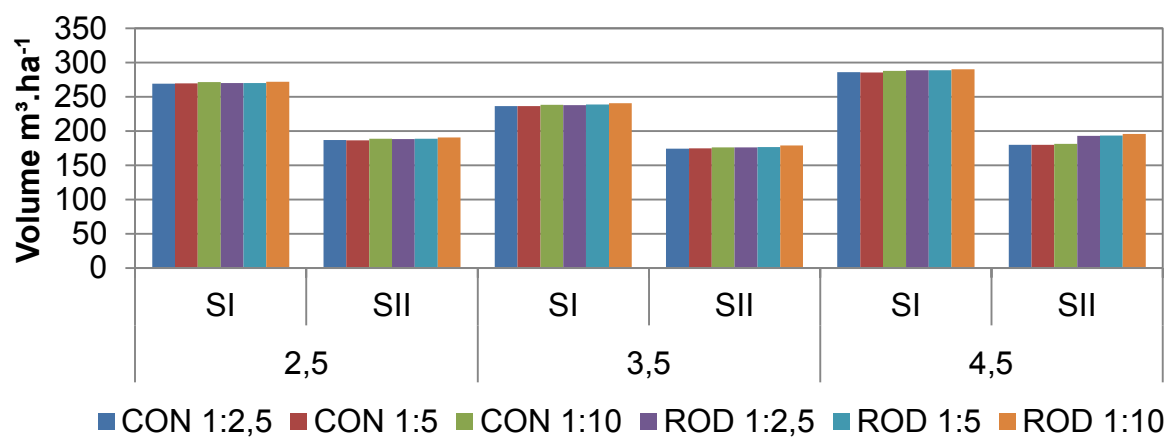


FIGURA 4.9 – PROGNOSE DO VOLUME AOS 7 ANOS PARA AS DIFERENTES SIMULAÇÕES EM POVOAMENTOS DE *Eucalyptus* sp. EM REGIÃO TROPICAL DO BRASIL.
 FONTE: O AUTOR (2015).

4. CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados neste capítulo, é possível concluir que o processo de amostragem em rodízio utilizado em povoamento de *Eucalyptus* sp. em região tropical do Brasil apresenta estimativas apropriadas para o volume (m^3) de cada *UAP* e classe de sítio, resultando em estimadores precisos para as intensidades amostrais de 1:2,5, 1:5 e 1:10 hectares.

A estatística da amostragem estratificada apresenta resultados satisfatórios, com erros inferiores ao usualmente admitidos pelas empresas florestais para inventários florestais contínuos.

A aplicação do modelo de Clutter (1963) se demonstra estável e com estimativas semelhantes do volume ($m^3.ha^{-1}$) na idade de referência de 7 anos, entre o processo de amostragem convencional e em rodízio, para as intensidades amostrais 1:2,5, 1:5 e 1:10 hectares.

A estrutura da amostragem no processo de amostragem em rodízio dobra a intensidade amostral em nível de talhões, permitindo aumento de precisão nos seus estimadores volumétricos devido a melhor detecção da variação de sítios, consequentemente até ao final do ciclo produtivo dispensará a implantação de inventários pré-cortes utilizados especificamente para conseguir tal objetivo quando se efetua o suprimento de madeira para a indústria;

Com a eficiência estatística conseguida pelo processo de amostragem em rodízio, sua aplicação nas empresas trará sensíveis reduções de custos na execução dos seus inventários florestais contínuos.

5. RECOMENDAÇÕES

Para uma aplicação adequada do processo de amostragem em rodízio, recomenda-se elaborar previamente uma classificação de sítio apropriada de todas as *UAP*'s que compõem o ativo florestal em estudo e estruturação adequada de suas áreas de abrangência. Para isso, o uso da geoestatística associada aos tradicionais métodos de classificação de sítio, permite a adequada delimitação e respectivo cálculo de área dessa importante variável dentro da cada *UAP*.

Recomenda-se o uso do processo de amostragem em rodízio para intensificar o sistema de amostragem atual das empresas florestais, com objetivo de reduzir a necessidade de inventário pré-corte, aumentar a precisão dos estimadores amostrais ou até mesmo como forma de redução de custos anuais do inventário florestal contínuo, dado a possibilidade de se medir com a mesma precisão, apenas 50% da floresta em cada ano de mensuração.

Novos estudos em povoamentos de outras espécies deverão ser conduzidos, a fim de testar a robustez do processo de amostragem em rodízio quando utilizado em bases de dados mais heterogêneas.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BICFORD, C. A. On successive Forest inventories. **Pro. Soc. of American Foresters**, 1963, p. 25-30

CLUTTER, J.L. Compatible growth and yield models for loblolly pine. **Forest Science**, v. 9, n. 4, p. 354-371., 1963.

IGNÁCIO, S. A. **Precisão e eficiência de processos de subamostragem com unidades primárias de tamanhos desiguais em inventários de plantações de *Eucalyptus* spp.** Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná. 143 p., 2001.

KANGAS, A. MALTAMO, M. **Forest inventory methodology and applications.** Springer, Dordrecht, 362 p., 2006.

MARQUARDT, D. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. **Journal of the Society for Industrial on Applied Mathematics**, 11(2): 431-441., 1963.

PÉLLICO NETTO, S e BRENA, D. A. **Inventário Florestal.** Ed. pelos autores. Curitiba, 316 p., 1997.

PÉLLICO NETTO, S. **Die Forstinventuren in Brasilien**, Neue Entwicklungen und ihr Beitrag für eine geregelte Forstwirtschaft, Freiburg. 234p., 1979.

PÉLLICO NETTO, S.; STEFANELLO, F. R.; PELLISSARI, A. L.; DAVID, H. C. Mapping of sites in Forest stands. **An. Acad. Bras. Cienc.**, Rio de Janeiro, v. 86, n. 4, 2025-2037, 2014.

SANQUETTA, C. R., DALLA CORTE, A. P., RODRIGUES, A. L., WATZLAWICK, L. F. **Inventários Florestais: Planejamento e Execução.** 3ª edição, Revisada e Ampliada. Editor: Carlos Roberto Sanquetta. Multi-Graphic, Gráfica e Editora. Curitiba, 406 p., 2014.

SATTERTHWAITE, F. E. An approximate distribution of estimates of variance components. **Biometrics**, (2) p. 110-114, 1946.

SCHMID, P. **Swiss Continuous Forest Inventory**, Swiss Forest Research Institute, Birmensdorf, Zurich. 1971. 187p.